Website: https://www.Sepehr.org Online ISSN: 2588-3879; Print ISSN: 2588-3860

Scientific - Research Quarterly

Geographical Data (SEPEHR) Vo.35, No.138, Summer 2026

P.P 91-114

Research paper

https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2021622.3055

Prediction of land use and land cover changes using the Cellular Automata Markov Chain approach West of Gilan Province

Leila Vosoughi.rad*[1], Seyyed Hossein Mirmousavi[2], Hossein Asakere[3]

1- (*Corresponding author) Doctoral student of climatology, Zanjan University, Zanjan, Iran. Email: L_vosoughirad@znu.ac.ir

2- Associate professor, Faculty member of Zanjan University, Zanjan, Iran. Email: hossein.mirmousavi@znu.ac.ir

3- Professor, Faculty member of Zanjan University, Zanjan, Iran. Email: Asakereh1@yahoo.com

Article Info

Date of receive:

2024/02/05

Date of last review:

2024/09/22

Date of accept:

2024/09/24

Date of online publication:

2024/09/29

Keywords:

Land Use/ Land cover changes,
Changes detection,
Prediction,
Gilan Province

Extended Abstract

Introduction

The changes of land use and land cover is a multifaceted process influenced by human activities and natural processes, leading to disruptions in ecosystem functions. To mitigate the adverse effects of changes in land use and land cover, a fundamental strategy involves the systematic assessment of these changes. In this regard, remote sensing, as a key technology, provides the ability to collect spatial data from the Earth's surface without the need for physical contact. By using remote sensing data, geographic information systems (GIS), and advanced modeling techniques, it is possible to identify and model land use and land cover changes across different temporal and spatial scale. The CA-Markov model, by combining two main approaches cellular automata for simulating spatial changes based on the neighborhood of cells and Markov chains for modeling temporal changes based on the probability of transitions between different states, enables precise analysis of these changes. This research aims to identify and monitor land use and land cover changes in the western region of Gilan Province, one of the most important tourist and residential areas in northern Iran, and attempts to reveal changes between the years 1999, 2010, and 2023, as well as predict land use land cover changes in this region from 2023 to 2043. By using the results of this prediction, the necessary groundwork for planning to implement appropriate policies regarding land management and the optimal use of agricultural and forest lands will be provided.

Materials & Methods

The base data in this study are Landsat 5, 7, and 8 images, and the data source is the Google Earth Engine platform. The images were classified using the random forest algorithm in Google Earth Engine... **Page 92**

How to Cite:

Vosoughi.rad, L. Mirmousavi, S.H. Asakereh, H. (2026). Prediction of land use and land cover changes using the Cellular Automata Markov Chain approach, West of Gilan Province. Scientific-Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 35(138), 91-114.

To evaluate the accuracy of the classified images, the quantity and allocation disagreement index was used, and after ensuring the classification accuracy, the areas converted between different land uses were calculated using GIS. Before modeling, in order to improve the accuracy of the prediction model, land suitability maps were created based on criteria such as slope, elevation, soil type, etc., as well as socio-economic factors for each class using the multi-criteria evaluation method and integrated with the Cellular Automata-Markov Chain model. Then, the simulated map for 2023 was generated and compared with the 2023 ground truth map using the Allocation Disagreement, Quantity Disagreement, and Figure of Merit indices for validation. Finally, after confirming the validation results, the pattern of land use and land cover classes for 2043 was predicted using the Cellular Automata-Markov Chain method within the IDRISI TerrSet software platform.

Results and discussion

The present study investigates land use and land cover changes in the western region of Gilan Province from 1999 to 2023 and provides a prediction of changes until 2043. This research was conducted using remote sensing techniques and geographic information systems (GIS). After classifying the images, the accuracy of the classified maps was calculated using the quantity and allocation disagreement index (QADI). The QADI values for 1999, 2010, and 2023 were 0.009, 0.01, and 0.02, respectively, indicating high accuracy of classification. Also, Kappa coefficient (KC) and overall accuracy (OA) of more than 96% confirm the very good efficiency of RF algorithm in decision making and classification. For validating the Markov Chain Cellular Automata model, three main criteria were used: spatial allocation disagreement, quantity disagreement, and figure of merit. The values obtained for these criteria were 4.65% for spatial allocation disagreement, 2.02% for quantity disagreement, and 48.60% for the figure of merit. These values indicate the good performance of the model in simulating and predicting land use/cover changes. The examination of the area of each class indicates a decrease in the area of forest lands, agricultural lands, and wetland zones, as well as an increase in the area of built-up areas and rangelands during the baseline study period (1999-2023) and in the predicted future decades. This study highlights the ongoing trend of decreasing natural land areas and the increasing human activities and urban development in the upcoming periods.

Conclusion

Predicted maps play an important role in estimating land use changes and natural resources, such as forests, water bodies, biodiversity, soil, minerals and other elements. These maps serve as practical tools for informed decision-making in environmental planning and resource management and enable policy makers to prevent adverse environmental consequences. In this research, three-time Landsat satellite images and random forest classification algorithm were used in Google Earth Engine platform to detect historical changes in land use and land cover from 1999 to 2023. The accuracy of the classified images was verified using the QADI index. In order to improve the efficiency of the of Cellular Automata-Markov chain model, in predicting future spatial changes, the multi-criteria evaluation method was integrated with this model. Then, by confirming the validity of the simulator model, it was possible to predict land use and land cover changes for 2043. The results showed that in the study area during the historical period, built-up areas and rangelands grew by 99.75% and, 6.57%, respectively, while forest cover, wetlands, and agricultural lands lost 3.33, 24.38 and 1.96%, of their area, respectively. Also, for the future period, the CA-Markov model predicted a significant reduction in the extent of forest lands, wetlands, and agricultural lands, while predicting an increase in built-up areas. This observed decrease shows the alarming trend of destruction of natural resources and environment. This information can help decision makers in natural resource management to implement preventive measures and continuous management to preserve natural environments.

شاپای الکترونیکی: 2588-3879 / شاپای چاپی: 2588-3860
تارنمای نشریه https://www.Sepehr.org

فصلنامه علمی - پژوهشی
اطلاعات جغرافیایی (سپهر) دوره ۳۵، شماره ۱۳۸، تابستان ۱۴۰۵

مقاله پژوهشی
صفحات ۱۱۴ - ۹۱

https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2021622.3055

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین با رویکرد سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف؛ غرب استان گیلان

لیلا وثوقی راد*[۱]، سیدحسین میرموسوی[۲]، حسین عساکره[۳]

۱- (*نویسنده مسئول) دانشجوی دکترای آب‌وهواشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. L_vosoughirad@znu.ac.ir
۲-دانشیار دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. hossein.mirmousavi@znu.ac.ir
۳-استاد دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. Asakereh1@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۱۱/۱۶
تاریخ آخرین بازنگری:
۱۴۰۳/۰۷/۰۱
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۷/۰۳
تاریخ انتشار:
۱۴۰۳/۰۷/۰۸

واژه‌های کلیدی:

تغییرات کاربری اراضی/ پوشش زمین؛
آشکارسازی تغییرات؛
پیش‌بینی؛
استان گیلان

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین (LULCc)در منطقه غرب استان گیلان از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۳ و برآورد تغییرات تا سال ۲۰۴۳ می‌پردازد. داده های پایه دراین مطالعه تصاویر لندست ۵، ۷، و۸ هستند. طبقه‌بندی تصاویر و آشکار سازی تغییرات با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (RF) در پلت فرم GEE (Google Earth Engine) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد. به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی تا سال ۲۰۴۳ از مدل سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف (CAMarkov) استفاده شد. با استفاده از شاخص اختلاف کمّیت و تخصیص (QADI) دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده محاسبه شد. مقادیر QADI برای سال های ۱۹۹۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ به ترتیب ۰/۰۲، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۹ بود که نشان‌دهنده دقت بالای طبقه‌بندی است. همچنین ضریب کاپا (KC) و دقت کلی (OA) بالای ۹۶ درصد، کارایی بسیار خوب الگوریتم RF را در تصمیم‌گیری و طبقه‌بندی تأیید می‌کند. برای افزایش دقت مدل پیش‌بینی کننده ماژول ارزیابی چندمعیاره (MCE) با این مدل ادغام شد. اعتبار سنجی مدل با استفاده از سه معیار اختلاف تخصیص (AD)، تفاوت کمّیت (QD) و شاخص شکل شایستگی (FOM) انجام شد. مقدار کلی برای این سه فاکتور به ترتیب ٤/٦٥، ۲/۰۲ و ٤٨/٦٠ درصد برآورد شد. یافته ها حاکی از کاهش مساحت اراضی جنگلی، زمین‌های کشاورزی و پهنه تالاب و همچنین افزایش مساحت مناطق ساخته شده و اراضی مرتعی در دوره پایه مورد مطالعه (۲۰۲۳-۱۹۹۹) و دهه‌های آتی پیش‌بینی شده است. این یافته‌ها به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با شناسایی میزان تخریب اراضی طبیعی و بهبود مدیریت آن‌ها، شرایط توسعه پایدار منطقه را در آینده فراهم کنند.

استناد به این مقاله:

وثوقی راد، ل؛ میرموسوی، س.ح؛ عساکره، ح (۱٤۰۵) پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین با رویکرد سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف ؛ غرب استان گیلان؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی(سپهر)، ۳۵(۱۳۸)، ۱۱٤ – ۹۱.

۱- مقدمه

تغییر کاربری و پوشش زمین یک فرآیند چند وجهی است که تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای طبیعی بوده و باعث اختلال در عملکرد اکوسیستم‌ها می‌شود *(Hellwig et al, 2019: 1; Liu et al, 2021:14)*. میزان و شدت تغییرات کاربری و پوشش زمین در دهه‌های اخیر در سطوح مختلف از مقیاس محلی تا جهانی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. به ویژه در کشورهای در حال توسعه، به دلیل استفاده ناپایدار از منابع و فشار جمعیت شدت تغییرات بیش‌تر شده *(Buraka et al, 2021: 582; Leta et al, 2021a:17)* و پیامدهای نامطلوبی بر اقلیم جهانی، تنوع زیستی، فرسایش خاک *(Prashanth et al, 2023:2&15)* به هم خوردن تعادل آب‌های سطحی و زیر زمینی *(Mengistu et al, 2022:15)* و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. برای کاهش اثرات نامطلوب تغییرات در کاربری اراضی و پوشش زمین، یک استراتژی اساسی، ارزیابی سیستماتیک این تغییرات است. در این راستا، سنجش از دور به عنوان یک فناوری کلیدی، امکان جمع‌آوری داده‌های مکانی از سطح زمین را بدون نیاز به تماس فیزیکی فراهم می‌کند *(Feizizadeh et al, 2021:2; Singh et al, 2023:1199)*. پلتفرم‌های پیشرفته‌ای مانند گوگل ارث انجین نیز دسترسی سریع و آسان به تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا و تحلیل‌های پیچیده را ممکن می‌نمایند *(Nasiri et al., 2022:13)*. با استفاده از داده‌های سنجش از دور، تکنیک‌های پیشرفته مدل‌سازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌توان تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین را در ابعاد زمانی و مکانی مختلف شناسایی و مدل‌سازی کرد *(Mahto et al, 2022:1681)*. در واقع مدل‌سازی‌ها ابزارهای مهمی برای تحلیل مکانیسم این تغییرات و ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی آن‌ها هستند و به درک بهتر از فرآیندها و پیش‌بینی روندهای آینده کمک می‌کنند *(He et al, 2022:539)*. در میان مدل‌های مختلف موجود برای پیش‌بینی و تحلیل تغییرات سطح زمین، مدل CA-Markov به دلیل توانایی آن در ادغام تحلیل‌های مکانی و زمانی، و با در نظر گرفتن عوامل متعدد مؤثر بر تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین، برجسته است *(Fu et al, 2022:3)*. این مدل با ترکیب دو رویکرد اصلی، یعنی سلول‌های خودکار برای شبیه‌سازی تغییرات مکانی بر اساس همسایگی سلول‌ها و زنجیره مارکوف برای مدل‌سازی تغییرات زمانی بر اساس احتمال انتقال بین حالت‌های مختلف، امکان تحلیل‌های دقیق‌تری را فراهم می‌آورد *(Li, 2022:1)*. علاوه بر این، از طریق تجزیه و تحلیل چند معیاره، مدل CA-Markov می‌تواند به طور همزمان تأثیر عوامل طبیعی مانند توپوگرافی، خاک و آب‌وهوا و همچنین عوامل انسانی مانند جمعیت، سیاست و اقتصاد را بر تغییرات کاربری زمین ارزیابی کند *(Getachew et al, 2021:2)*.

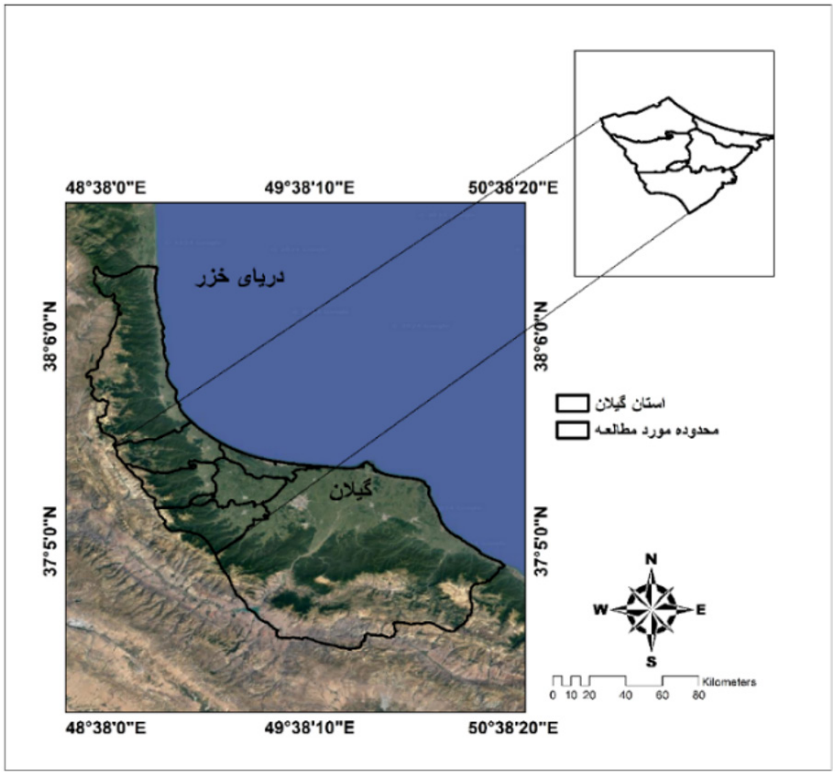
در سرتاسر جهان مطالعات متعددی همچون پژوهش‌های (ریمال و همکاران[1] (۲۰۱۷)، حسن[2] (۲۰۲٤)، نگوین[3] (۲۰۲۳)، مؤذنی و همکاران (۱۳۹۹)، منصور و همکاران[4] (۲۰۲۰)، لیپینگ و همکاران[5] (۲۰۱۸)، چن و همکاران[6] (۲۰۲٤) و آسیف و همکاران[7] (۲۰۲۳)، احدنژاد روشتی و همکارن (۲۰۲۱)، عربی علی‌آباد و همکاران (۲۰۲۱)، کیانپور گل‌خواجه و همکاران (۲۰۲۲)، ماناکانه[8] (۲۰۲۳)، ژانگ و همکاران[9] (۲۰۲٤)، صراف و همکاران[10] (۲۰۲٤)، زیمبا و همکاران[11] (۲۰۲٤)، داس سانتوس و همکاران[12] (۲۰۲٤) و الیعقوبی و همکاران[13] (۲۰۲٤) به ترتیب در زمینه‌های گسترش شهری، تخمین فشار بر منابع بیولوژیکی، چالش‌های زیست محیطی و تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین از مدل سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف برای بررسی تغییرات

1. Rimal et al
2. Hasan
3. Nguyen
4. Mansour et al
5. Liping et al
6. Chen et al
7. Asif et al
8. Manakane
9. Zhang et al
10. Saraf et al
11. Zimba et al
12. dos Santos et al
13. Alyaquby et al

بهره برده‌اند. این پژوهش با هدف شناسایی و پایش تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین در غرب استان گیلان که مهم‌ترین مناطق گردشگری و سکونتگاهی شمال ایران است انجام شده و سعی شده تا ضمن آشکار سازی تغییرات در بین سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ نسبت به پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در این منطقه از سال ۲۰۲۳ تا ۲۰۴۳ اقدام شود تا با بهره‌گیری از نتایج این پیش‌بینی زمینه لازم برای برنامه‌ریزی به‌منظور اعمال سیاست‌های درست در خصوص آمایش و استفاده بهینه از اراضی زراعی و جنگلی وسایر منابع طبیعی فراهم آید.

و ۰۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ٦۷ دقیقه عرض شمالی از خط استوا گسترش یافته است (نگاره ۱). بلندترین ارتفاع منطقه ۳۰٦۹ متر و کمترین ارتفاع آن ۲٦- متر است. این منطقه به دلیل مجاورت با دریای خزر، چشم‌اندازهای طبیعی زیبا، اقتصاد پویا، ظرفیت‌های کشاورزی و میراث فرهنگی متنوع، نقش بسزایی در زمینه‌های گردشگری، اقتصادی و فرهنگی دارد (*Ramazannejad et al, 2021:102*). آب‌وهوای این منطقه در دشت‌ها معتدل و مرطوب و در نواحی کوهستانی مرطوب و سرد است.

در پژوهش حاضر برای ارزیابی تغییرات اراضی در منطقه



نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۲- داده و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه بخشی از ناحیه غربی استان گیلان شامل شهرستان‌های بندر انزلی صومعه سرا، فومن، ماسال و رضوانشهر را در برمی‌گیرد. مساحت این منطقه ۳۰۱٤۵۰ هکتار است و مختصات آن از ٤۸ درجه و ٦۷ تا ٤۹ درجه و ٦۹ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۳۷ درجه

غرب استان گیلان از تصاویر ماهواره لندست ۵، ۷ و ۸ موجود در آرشیوگوگل ارث انجین با وضوح ۳۰ متر برای سال‌های ۲۰۲۳، ۲۰۱۰ و ۱۹۹۹ استفاده شده است. تصاویر دریافتی لندست ۷ در سال ۲۰۱۰ به دلیل وجود خطای راه‌راه‌شدگی خطوط که موجب پایین آمدن دقت این تصاویر می‌شد، حذف و بجای آن از تصاویر لندست۵ استفاده شد.

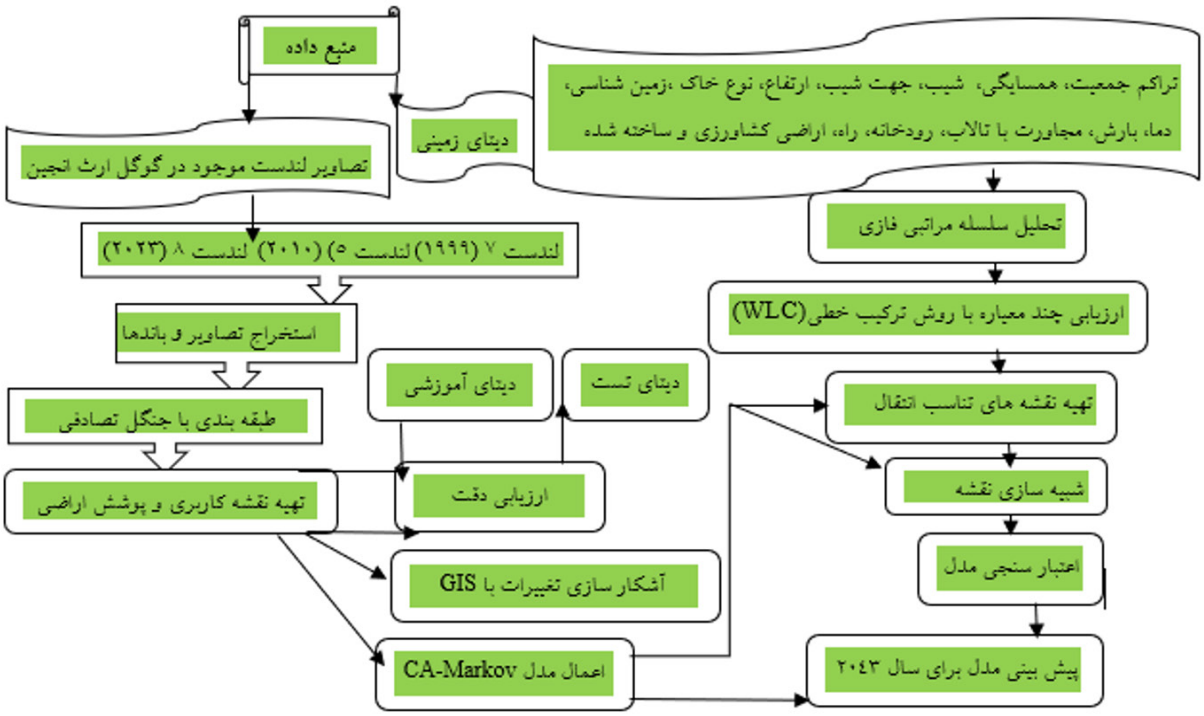
جدول ۱: اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

تصاویر ماهواره	سنجنده	تاریخ اخذ اطلاعات	گذر/ ردیف	وضوح
لندست ۷	+ETM	۱۹۹۹/۰۵/۳۰-۱۹۹۹/۰۹/۳۰	۱۶۶۶/۳۴	۳۰
لندست ۵	TM	۲۰۱۰/۰۵/۳۰-۲۰۱۰/۰۹/۳۰	۱۶۶۶/۳۴	۳۰
لندست ۸	OLI	۲۰۲۳/۰۵/۳۰-۲۰۲۳/۰۹/۳۰	۱۶۶۶/۳۴	۳۰

به منظور تهیه نقشه‌های تناسب اراضی از پارامترهای مختلفی استفاده شده است. این پارامترها شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب بر اساس دم[1] ۳۰*۳۰ متر ماهواره SRTM[2]، مستخرج از سایت https://earthexplorer.usgs.gov/، سازند زمین‌شناسی (سازمان زمین‌شناسی کشور)، لایه رودخانه‌ها، نوع خاک، لایه خطوط هم‌دما و هم‌بارش (سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور)، تراکم جمعیت (لایه جمعیت اخذ شده از مرکز آمار ایران)، فاصله از جاده‌ها (سازمان راه و شهرسازی)، همسایگی، نزدیکی به زمین‌کشاورزی، مناطق مسکونی، و فاصله از تالاب (لایه‌های فعلی کاربری اراضی) هستند. برای مطالعه تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین که در مقیاس بزرگ و در طول زمان اتفاق می‌افتند، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم‌های تحلیل فضایی مثل GIS ضروری است *(Ahmad et al, 2022:1425)* در پژوهش حاضر پس از اخذ تصاویر لندست، الگوریتم جنگل تصادفی در گوگل ارث انجین برای طبقه‌بندی و شاخص اختلاف کمّیت و تخصیص برای ارزیابی دقت و صحت تصاویر طبقه‌بندی شده مورد استفاده قرار گرفتند و پس از اطمینان از دقت و صحت طبقه‌بندی، مساحت‌های تبدیل شده بین کاربری‌های مختلف با استفاده از GIS محاسبه شد. برای بهبود دقت مدل پیش‌بینی کننده با استفاده از روش ارزیابی چند معیاره نقشه‌های تناسب اراضی بر اساس معیارهای مربوط به ویژگی‌های فیزیکی زمین و عوامل اجتماعی و اقتصادی برای هر کلاس ایجاد و با مدل سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف ادغام شد. سپس نقشه شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۲۳ تولید شد و با استفاده از شاخص‌های اختلاف تخصیص اختلاف کمّیت و شاخص شکل شایستگی با نقشه واقعیت زمینی (حاصل ازتصاویر گوگل ارث و بازدید میدانی)، سال ۲۰۲۳ مقایسه و اعتبارسنجی شد. در نهایت، پس از تأیید نتایج اعتبار سنجی، الگوی کلاس‌های کاربری اراضی و پوشش زمین برای سال ۲۰۴۳ با روش سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف در بستر نرم افزار IDRISI TerrSet پیش‌بینی شد (نگاره ۲).

همان طور که در قسمت پیشین ذکر شد از الگوریتم جنگل تصادفی برای فرآیند طبقه‌بندی استفاده شده است. این الگوریتم طبقه‌بندی را با به کارگیری مجموعه‌ای از درختان تصمیم انجام می‌دهد. هر درخت به صورت جداگانه یادگیری را انجام می‌دهد و خروجی نهایی بر اساس آراء بیش‌ترین تعداد درخت‌ها تولید می‌شود*(Sidiq & Saputro, 2023:849)* . تحقیقات قبلی نشان داده است که استراتژی یادگیری جنگل تصادفی با انتخاب حیاتی‌ترین متغیرها به طور قابل توجهی حجم داده‌ها را کاهش می‌دهد *(Gómez et al, 2016:62)* و پردازش داده‌های عظیم را سرعت می‌بخشد *(Basukala et al, 2017:191)* در این الگوریتم تعداد درختان یکی از پارامترهای کلیدی است. اگرچه تعداد درختان می‌تواند زیاد باشد، اما مطالعات قبلی نشان داده‌اند که تعداد بهینه درختان بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ است. این به این دلیل است که فراتر از یک آستانه مشخص، درخت‌های اضافی زائد می‌شوند و منجر به بهبود بیشتر دقت طبقه‌بندی نمی‌شوند *(Sun and Ongsomwang, 2023:14)*. ارزیابی دقت تصاویر ماهواره‌ای که با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی کننده ایجاد می‌شوند ضروری است *(Wang et al,*

1. Dem
2. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)



نگاره ۲: مراحل انجام پژوهش

2020:8. ماتریس خطا تکنیکی است که اغلب برای ارزیابی دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. این ماتریس داده‌های طبقه‌بندی شده را با داده‌های مرجع به دست آمده از منابع مختلف مانند تصاویر ماهواره‌ای، مشاهدات زمینی و عکس‌های هوایی مقایسه می‌کند. ماتریس خطا معیارهای آماری دقت تولید کننده، دقت کاربر، دقت کلی و ضریب کاپا را ارائه می‌دهد *(Rwanga et al, 2017:612)*. از بین این معیارها ضریب کاپا اغلب برای ارزیابی توافق و قابلیت اطمینان در علوم مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضریب کاپا با استفاده از روابط (۱) تا (۳) محاسبه می‌شود *(Congalton& Green, 2019:128)*.

$$g\ \text{kappa coefficient} = \frac{Po - Pc}{1 - Pc} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) po توافق مشاهده شده است که از ورودی‌های قطری در ماتریس خطا با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$Po = \sum_{i=1}^{r} \frac{y_{ii}}{N} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) PC مقدار توافق شانسی (توافق مورد انتظار) است که از معادله (۳) به دست می‌آید:

$$pc = \sum_{i=1}^{r} \frac{y_{i+}}{N} * \frac{y_{+i}}{N} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) y_{i+} مجموع ردیف i در ماتریس خطا ، y_{+i} مجموع ستون i در ماتریس خطا و N مجموع پیکسل‌های طبقه‌بندی شده است.

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر تعدادی از محقیقن محدودیت‌هایی را در ارتباط با استفاده ضریب کاپا مطرح نموده‌اند در پاسخ به این محدودیت‌ها معیارهای جایگزین را برای ارزیابی دقت پیشنهاد کرده‌اند. یکی از این گزینه‌ها، شاخص اختلاف کمّیت و تخصیص (QADI) است که توسط *(Feizizadeh et al, 2022: 3)* برای ارزیابی دقت تصاویر طبقه‌بندی شده مبتنی بر سنجش از دور ابداع و معرفی شد. در این مطالعه نیز از آن استفاده شده است. شاخص اختلاف کمّیت و تخصیص از معادله (٤) به دست می‌آید:

$$QADI = \sqrt{\left(\frac{A}{N}\right)^2 + \left(\frac{Q}{N}\right)^2} \qquad (٤)$$

در رابطه ٤ (A) تعداد پیکسل‌ها را با برچسب‌های اشتباه نشان می‌دهد، (Q) نشان‌دهنده تفاوت پیکسل بین نقشه طبقه‌بندی‌شده و داده‌های واقعی زمین است و N مجموع پیکسل‌های طبقه‌بندی‌شده است. این شاخص علاوه بر محاسبه مقدار عددی و نمودار شاخص QADI شاخص‌های سنتی مانند کاپا و دقت کلی را نیز محاسبه می‌کند. در جایگاه مقایسه کاپا یک ابزار پرکاربرد در علوم مختلف مانند روانشناسی و علوم اجتماعی برای ارزیابی دقت است، اما کاربرد اصلی QADI در سنجش از دور است. QADI دقیق‌تر است و تحت تأثیر توزیع داده‌های کج قرار نمی‌گیرد. این شاخص با استفاده از شاخص‌های (Q) و (A) علت اختلاف بین نقشه شبیه‌سازی شده و پایه را توضیح می‌دهد. در نتیجه در درک نقش A و Q در عدم توافق به کاربران کمک می‌کند تا منبع خطا را شناسایی کنند، و خطاهای ناشی از دقت کاربر و الگوریتم طبقه‌بندی کننده را کاهش دهند و بهترین الگوریتم طبقه‌بندی کننده را انتخاب کنند. مقیاس QADI بین ۰ و ۱ متغیر است (جدول ۲).

در پژوهش حاضر به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی تا سال ۲۰٤۳ از مدل سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف استفاده شده است. این مدل یک رویکرد ترکیبی است که ویژگی‌های زمانی و مکانی زنجیره مارکوف و اتوماتای سلولی (CA) را ترکیب می‌کند. سلول‌های خودکار یک مدل ریاضی هست که فضا را به شبکه‌ای از سلول‌ها تقسیم می‌کند که هر کدام می‌توانند حالت‌های متفاوتی داشته باشند *(Altartouri et al, 2013:1648)*. وضعیت هر سلول در زمان‌های مختلف با قوانین خاصی که بر اساس وضعیت سلول‌های همسایه یا قوانین تصادفی بوده، تعیین می‌شود *(Reddy et al, 2017:2; Sabzpoushan et al, 2011:19)*. تکامل زمانی سلول‌های خودکار شامل تغییرات گام به گام است و وضعیت جدید هر سلول به حالات قبلی بستگی دارد. تحولات در سطح محلی می‌تواند به شبکه‌های پیچیده‌ای از الگوها و ساختارها در سطح کلی سیستم منجر شود *(Rodaro et al, 2013:2)*. در نتیجه، سلول‌های خودکار می‌تواند به توصیف و شبیه‌سازی الگوها، ساختارها و تحولات پیچیده در سیستم‌های مختلف کمک کند. ویژگی برجسته CA توانایی آن در به تصویر کشیدن پویایی الگوهای فضایی و اندازه‌گیری میزان تغییرات فضایی است*(Keshtkar et al, 2016:6)* . مدل CA از معادله (۵) محاسبه شده است *(Sang et al, 2011:940)*

$$ST, T+1=l\ (ST, n) \qquad (۵)$$

در رابطه (۵) S شرایط کاربری اراضی و پوشش زمین در دو زمان مختلف T و T+1 و متغیر n وضعیت پیکسل‌های همسایه را نشان می‌دهد و 1 قوانین انتقال محلی است. این قوانین بر اساس وضعیت خود سلول و وضعیت همسایگانش تعیین می‌شوند. زنجیره‌های مارکوف ابزاری اساسی در مدل‌سازی کاربری زمین و تغییرات پوشش زمین در طول زمان هستند. این زنجیره‌ها فرآیندهای تصادفی شامل انتقال بین حالت‌های مختلف بر اساس احتمالات هستند. در یک زنجیره مارکوف ماتریس گذر احتمال حرکت از یک حالت به حالت دیگر را در مرحله زمانی بعدی نشان می‌دهد *(Gemmechis, 2022:2)*.

در ماتریس مارکوف، یکی از شرط‌ها این است که

جدول ۲: درجه‌بندی شاخص QADI *(فیضی‌زاده و همکاران ٦: ۲۰۲۲)*

دقت طبقه‌بند؟	مقیاس کادی
طبقه‌بندی با صحّت و دقّت عالی	۰/۰ _ QADI < ۰/۰۷
طبقه‌بندی با صحّت و دقّت خوب	۰/۰۷ _ QADI < ۰/۱۲
طبقه‌بندی با صحّت و دقّت متوسط	۰/۱۲ _ QADI < ۰/۲۰
طبقه‌بندی با صحّت و دقّت ضعیف	۰/۲۰ _ QADI < ۰/۳۰
طبقه‌بندی تصادفی فاقد صحّت و دقّت	۱ _ QADI _ ۰/۳۰

مجموع عناصر در هر سطر برابر با ۱ باشد اما مجموع مقادیر در ستون‌ها لزوماً ۱ نیست. معادله (٦) نحوه محاسبه زنجیره مارکوف را ارائه می‌دهد:

$$S_{(T,T+1)} = P_{ij} * S_{(T)} \qquad (٦)$$

S (T) و S (T+ 1) به ترتیب بیانگر وضعیت کاربری اراضی و پوشش زمین در زمان T و T + 1 هستند و با استفاده از ماتریس انتقال مارکوف که در اینجا با Pij نشان داده شده و همچنین وضعیت در زمان S (T) محاسبه می‌شود. به عبارت ساده‌تر وضعیت آینده تغییر کاربری ارضی و پوشش زمین یعنی همان S (T+1) با استفاده از ماتریس انتقال مارکوف Pij و وضعیت در زمان S (T) محاسبه می‌شود. ماتریس احتمال انتقال مارکوف از معادله (۷) بدست می‌آید ***(Liping,2018: 5)***.

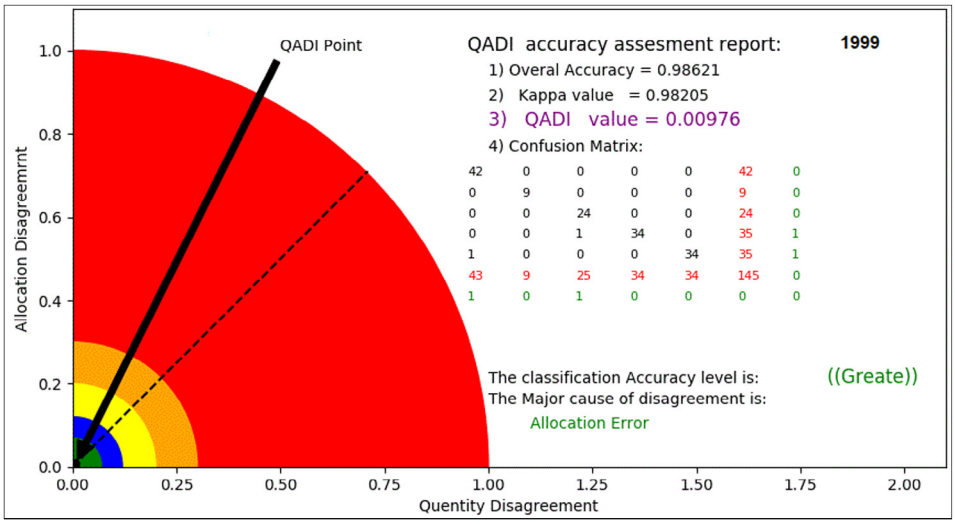
$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (0 \le P_{ij} \le 1) \qquad (٧)$$

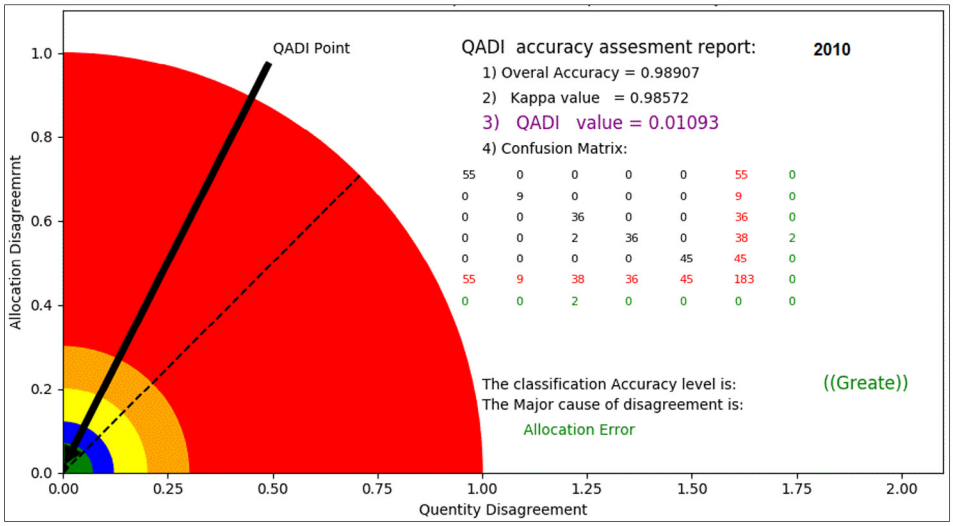
بر اساس معادله (۷)، P نماد ماتریس انتقال مارکوف و Pij احتمال تغییر کاربری اراضی و پوشش زمین از وضعیت i به وضعیتj در زمان بعدی هستند. Pn نمایانگر احتمال حالت در زمان مشخص n است. در ماتریس مارکوف احتمال انتقال کم نزدیک به (۰) است، در حالی که احتمال انتقال زیاد نزدیک به (۱) است. به این ترتیب، ماتریس انتقال مارکوف توصیف می‌کند که با چه احتمالی سیستم از یک وضعیت به وضعیت دیگر منتقل می‌شود. برای اطمینان از اینکه یک مدل عملکرد مورد نظر خود را انجام می‌دهد، ابتدا باید اعتبار سنجی شود. اعتبارسنجی شامل ارزیابی کیفیت، عملکرد و دقت مدل در زمینه‌های خاص است ***(Nyatuame et al, 2023:7)***. از طریق مقایسه داده‌های تولید شده توسط مدل‌های شبیه ساز با داده‌های واقعی زمین، می‌توان کارایی مدل را تأیید کرد. در این مطالعه اعتبارسنجی نقشه شبیه‌سازی شده توسط مدل، از طریق مقایسه آن با داده‌های واقعیت زمینی با استفاده از شاخص‌های پونتیوس و میلونز انجام شد. این شاخص‌ها شامل اختلاف تخصیص، اختلاف مقدار و شاخص شکل شایستگی هستند ***(Paegelow et al, 2022:153)***. اختلاف در تخصیص اختلاف مکانی کلاس‌های زمین میان نقشه شبیه‌سازی شده و نقشه واقعی را ارزیابی می‌کند. اختلاف مقدار به اختلاف میان کمّیت تغییرات پیش‌بینی‌شده توسط مدل و مقدار واقعی اشاره دارد و شاخص شکل شایستگی یک اندازه‌گیری جامع از دقت کلی مدل است که هم توزیع فضایی و دقت مکانی و هم دقت مقداری را در نظر می‌گیرد. محدوده آن از صفر (نشان دهنده عدم وجود توافق) تا صد درصد (توافق کامل) است. این شاخص ابعاد توافق و عدم توافق را در پنج حالت A:(A-B-A)، B:(A-B-B)، C:(A-B-C)، D:(A-A-B)، E:(A-A-A) نشان می‌دهد (جدول ۷). مقدار FOM با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شده است:

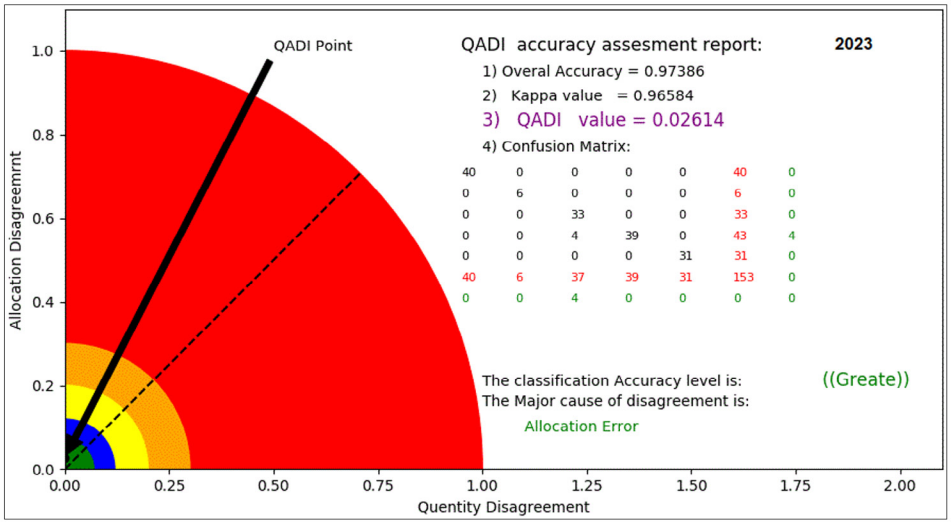
$$FOM = B / (A + B + C + D) \qquad (٨)$$

۳- نتایج و بحث

با استفاده از تصاویر لندست و الگوریتم طبقه‌بندی جنگل تصادفی در محیط گوگل‌ارث انجین، روند تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور پنج کلاس در نظر گرفته شد. کلاس اول زمین‌های جنگلی شامل مناطق پوشیده از درختان انبوه، کلاس دوم پهنه تالاب انزلی، کلاس سوم مناطق ساخته شده شامل تمام مناطقی است که توسط انسان‌ها ساخته شده‌اند، کلاس چهارم زمین‌های کشاورزی (کلیه اراضی تحت کشت دیم و آبی اعم از زراعت و باغات) و در نهایت مراتع (مناطقی با پوشش گیاهی علف‌ها، بوته‌ها، درختچه) هستند. همچنین به منظور ارزیابی دقت تصاویر طبقه‌بندی‌شده از شاخص QADI استفاده شد. مقدار حاصل از این شاخص برای سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ به ترتیب ۰/۰۰۹، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ برآورد شد که نشان‌دهنده دقت بالای الگوریتم طبقه‌بندی‌کننده است (نگاره ۳). طبق این نگاره خطای موجود در تصاویر هر سه سال، خطای تخصیص است. به طور معمول، منبع این خطا ناشی از برچسب‌گذاری نادرست پیکسل‌ها توسط الگوریتم طبقه‌بندی یا خطای کاربر است. شاخص QADI همچنین کاپا و دقت کلی را با استفاده از ماتریس خطا برای هر سه سال بالای ۹٦% محاسبه کرد.







نگاره ۳: ارزیابی دقت طبقه‌بندی با شاخص QADI برای سال‌های مورد مطالعه

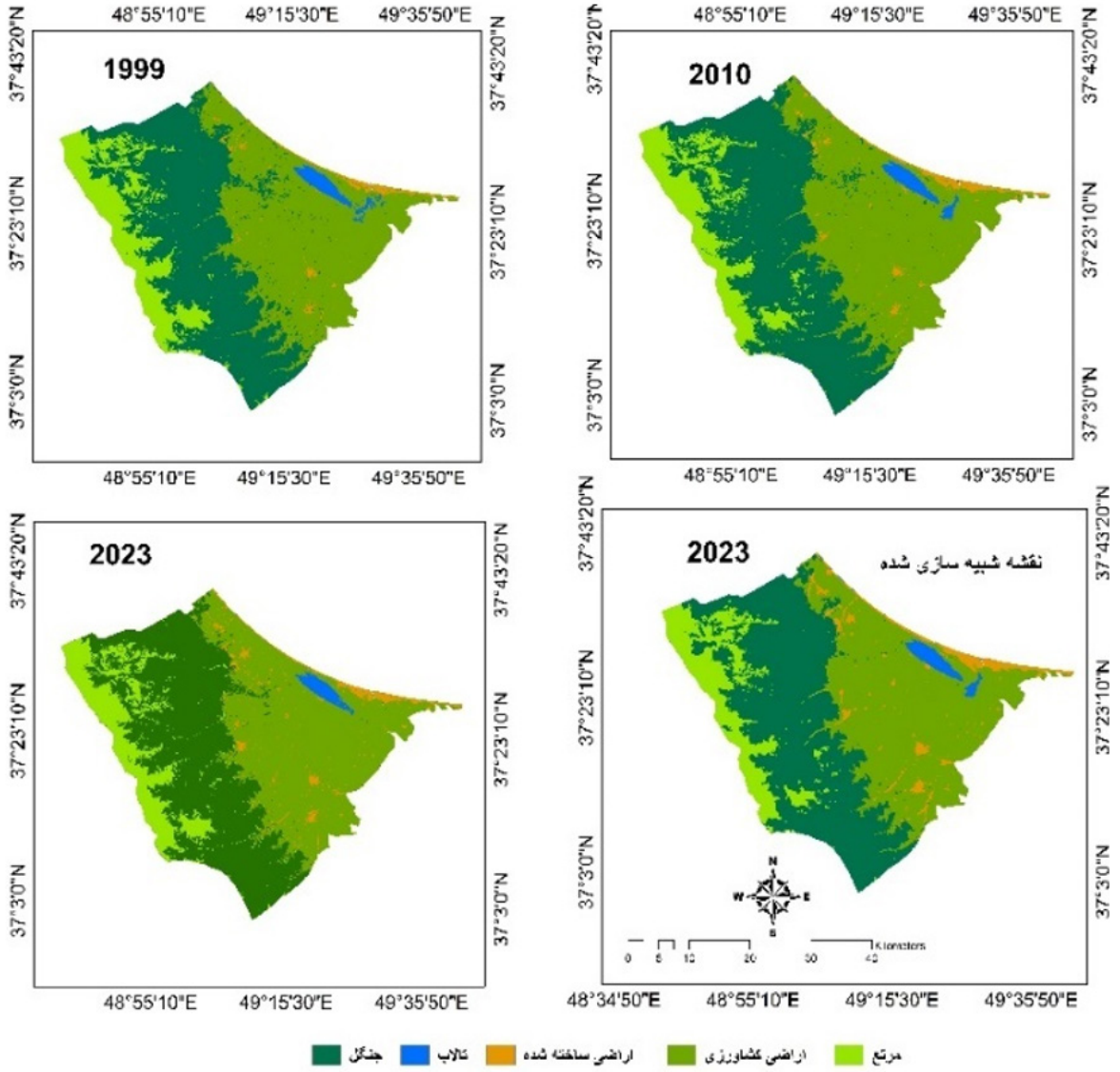
جدول ۳: تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین در سال‌های مختلف (هکتار)

انواع کاربری/ پوشش زمی	۱۹۹۹		۲۰۱۰		۲۰۲۳		تغیر خالص (ha)		
	مساحت(ha)	%	مساحت (ha)	%	مساحت (ha)	%	۱۹۹۹-۲۰۱۰	۲۰۱۰-۲۰۲۳	۱۹۹۹-۲۰۲۳
اراضی جنگلی	۱۲۹۲۷۲/۶۰	۴۲/۸۸	۱۳۰۰۷۷/۴۰	۴۳/۱۵	۱۲۴۹۶۵/۲۰	۴۱/۴۶	۸۰۴/۷۶	-۵۱۱۲/۲۱	-۴۳۰۷/۴۵
تالاب	۴۷۶۷/۳۵	۱/۵۸	۴۴۳۴/۴۹	۱/۴۷	۳۶۰۵/۰۳	۱/۲۰	-۳۳۲/۸۶	-۸۲۹/۴۶	-۱۱۶۲/۳۲
منطقه ساخته شده	۵۱۰۵/۸۹	۱/۶۹	۶۶۱۶/۵۶	۲/۱۹	۱۰۱۹۹/۲۲	۳/۳۸	۱۵۱۰/۶۷	۳۵۸۲/۶۶	۵۰۹۳/۳۳
زمین کشاورزی	۱۲۰۵۹۱/۹۰	۴۰/۰۰	۱۲۲۳۹۸/۱۰	۴۰/۶۰	۱۱۸۲۲۷/۷۰	۳۹/۲۲	۱۸۰۶/۲۱	-۴۱۷۰/۴۷	-۲۳۶۴/۲۶
مرتع	۴۱۷۱۲/۹۲	۱۳/۸۴	۳۷۹۲۴/۱۴	۱۲/۵۸	۴۴۴۵۳/۶۲	۱۴/۷۵	-۳۷۸۸/۷۹	۶۵۲۹/۴۸	۲۷۴۰/۷۰
جمع	۳۰۱۴۵۰/۷۰	۱۰۰/۰۰	۳۰۱۴۵۰/۷۰	۱۰۰/۰۰	۳۰۱۴۵۰/۷۰	۱۰۰/۰۰			

پس از اطمینان از دقت بالای طبقه‌بندی، نسبت به آشکارسازی تغییرات در بخش غربی استان گیلان اقدام شد. بررسی نتایج حاصل از طبقه‌بندی در سال‌های مختلف نشان داد که وسعت کلاس‌های جنگل، تالاب و زمین‌های کشاورزی از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۳ کاسته شده است. میزان کاهش خالص برای این کلاس‌ها به ترتیب ۴۳۰۷/۴۵، ۱۱۶۲/۳۲ و ۲۳۶۴/۲۶ هکتار بوده‌اند. در مقابل، رشد قابل توجهی در مناطق ساخته شده و مراتع مشاهده شد که به ترتیب ۵۰۹۳/۳۳ و ۲۷۴۰/۶۹ هکتار افزایش داشته‌اند (جدول ۳).

بررسی تغییرات طبقات مختلف کاربری اراضی و پوشش زمین در پهنه مورد مطالعه نیز نشان می‌دهد از سال ۱۹۹۹ تا سال ۲۰۲۳ ضمن کاهش وسعت تالاب انزلی و بخش‌هایی از جنگل و اراضی کشاورزی به بخش‌های انسان‌ساخت افزوده شده است. بیش‌ترین میزان این تغییرات به سمت مناطق جنگلی و پایکوهی است که نشان می‌دهد در ده سال اخیر با افزایش مهاجرت به مناطق شمالی کشور و همچنین افزایش تمایل به خرید زمین و ساخت ویلا و مجتمع‌های تفریحی و گردشگری بخش‌هایی از جنگل‌ها مراتع طبیعی و کشتزارها جای خود را به واحدهای ساخته شده داده‌اند که این موضوع نشان می‌دهد سرعت تغییرات در دهه‌های آتی نیز افزایش خواهد یافت (نگاره ٤).

پیش‌بینی دقیق توسط مدل CA-Markov نیازمند نقشه‌های تناسب اراضی است که به عنوان ماتریس گذر در این مدل استفاده می‌شوند. نقشه‌های تناسب اراضی به تحلیل و تخصیص بهینه فضای زمین برای گسترش طبقات مختلف کاربری اراضی و پوشش زمین براساس معیارهای مربوط به ویژگی‌های فیزیکی زمین و متغیرهای اجتماعی - اقتصادی می‌پردازند. در این پژوهش از معیارهای مختلفی برای تهیه نقشه‌های تناسب استفاده شد که شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، نوع خاک، مجاورت با جاده‌ها، رودخانه‌ها، فاصله از تالاب، زمین‌های کشاورزی، مناطق ساخته شده، تراکم جمعیت و همسایگی هستند. برای این منظور در مرحله نخست از تابع عضویت فازی



نگاره ٤: نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش زمین در سال‌های مورد مطالعه

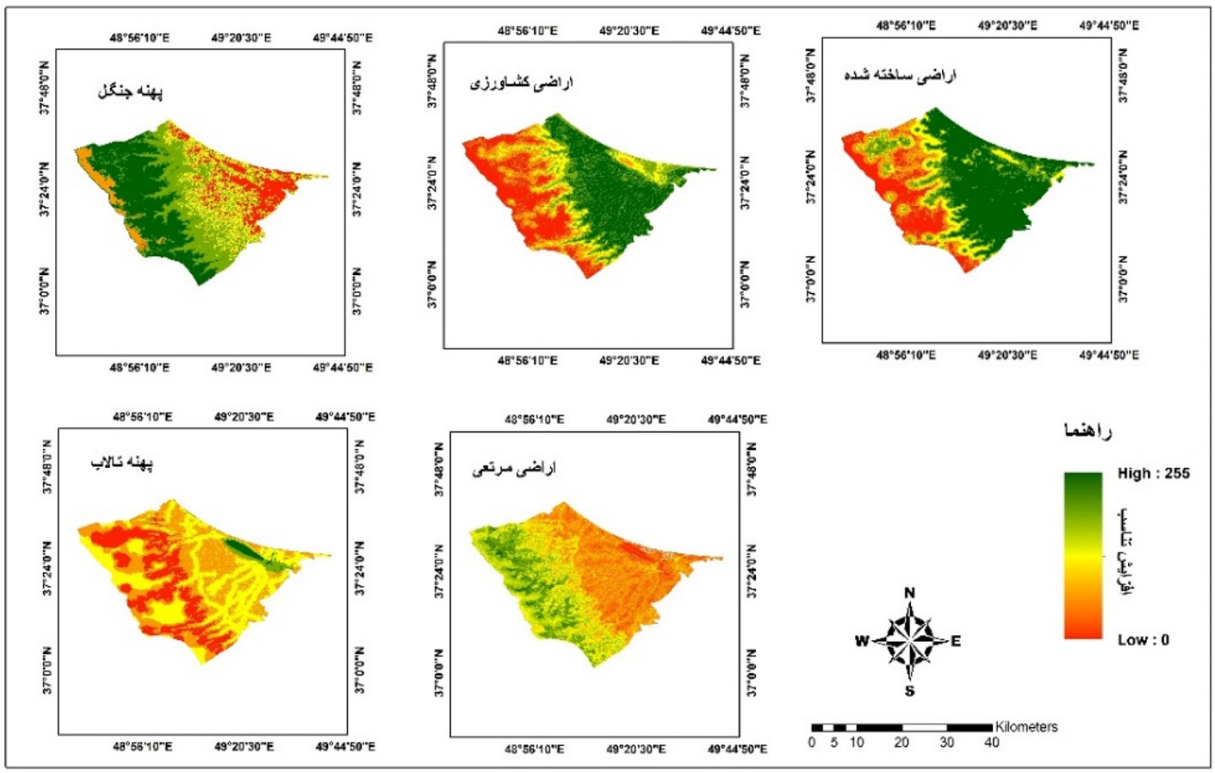
(خطی و j شکل) برای نرمال‌سازی این معیارها استفاده شد. سپس بر مبنای مدل فازی AHP و با بهره‌گیری از نظرات متخصصان و ساکنان بومی منطقه، ترجیح نسبی هر متغیر تأثیرگذار بر تناسب زمین برای هر کلاس کاربری اراضی و پوشش زمین مشخص شد. صحت این قضاوت‌ها با استفاده از نسبت سازگاری تأیید و بر اساس آن وزن نهایی اختصاص یافته به هر معیار تعیین شد (جدول ٤).

با استفاده از رویکرد ترکیب خطی وزنی در چارچوب مدل ارزیابی چند معیاره، نقشه‌های تناسب زمین برای هر کلاس تهیه شد. شکل بصری این نقشه‌ها نشان می‌دهد که هر کاربری تناسب زیادی با مکان فعلی خود داشته و این نقشه‌ها بر اساس معیارهای فیزیکی زمین و معیارهای انسانی، مکان‌های بهینه را برای گسترش آتی هر یک از کاربری‌ها نشان می‌دهند (نگاره ۵).

ماتریس مارکوف احتمال انتقال از یک حالت به حالت دیگر در زمان بعدی را نشان می‌دهد. در این مطالعه بر اساس مدل

جدول ٤: وزن‌های بدست آمده از مدل فازی AHP

معیار	جنگل	مناطق ساخته‌شده	اراضی کشاورزی	مرتع	تالاب
شیب	۰/۱۰۳۳	۰/۰۷۸	۰/۰٦٤۹	۰/۱۰۹٤	۰/۰٦۲٤
جهت شیب		۰/۰۵۰٤	۰/۰٤٤۸		
ارتفاع	۰/۰۸۳٦	۰/۰۷٤	۰/۰٦۱۱	۰/۰۸٦۳	
زمین شناسی				۰/۱۵۸	۰/۰۸٤
نوع خاک	۰/۰۵۰۵		۰/۰۸۸۳		
همسایگی	۰/۲۸۸٤	۰/۳۲۷۷	۰/۲۹۳۷	۰/۲۵۲۳	۰/۲۷۳٤
تراکم جمعیت		۰/۰۹٤			
نزدیکی به زمین کشاورزی	۰/۰۸۳٤				۰/۰۸۵۱
نزدیکی به مناطق مسکونی	۰/۰۵۹۵		۰/۰٦		۰/۰۸۱۷
نزدیکی به جاده	۰/۰۷۹٦	۰/۱۰۵۲	۰/۰۵٦۵	۰/۱۰٤٦	۰/۰۵۱۳
نزدیکی به رودخانه			۰/۱۰۳۳	۰/۰۸۵٤	۰/۱٦۱
دما	۰/۱۱۰۹	۰/۱۰۳	۰/۱۰۰۷	۰/۰۹۱۳	
بارش	۰/۱٤۰۸	۰/۱۰۱	۰/۱۲٦۷	۰/۱۱۲۷	۰/۲۰۱۱
فاصله از تالاب		۰/۰٦٦۷			
نرخ ناسازگاری	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰٤	۰/۰٦	۰/۰۱



نگاره ۵: نقشه تناسب زمین برای هر کلاس کاربری اراضی و پوشش زمین بر اساس مدل ارزیابی چندمعیاره

مارکوف در بازه زمانی ۲۰۱۰–۱۹۹۹ وضعیت احتمال انتقال بین کلاس‌های موجود در تصاویر طبقه‌بندی‌شده محاسبه شد. نتایج حاصل از این محاسبه مشخص نمود که کلاس اراضی جنگلی بالاترین ماندگاری را نشان می‌دهد و از سال ۲۰۱۰ تا ۱۹۹۹ به میزان ۸۹% ثابت مانده است. از سوی دیگر، اراضی مرتعی با ۷۸% درصد کم‌ترین ماندگاری را داشته است. عمده تغییرات مشاهده شده در این دوره عبارتند از: ۲۱ درصد از مراتع بر اساس ماتریس احتمال انتقال به جنگل تبدیل شده ۱۸ درصد از وسعت تالاب و ۱۱ درصد از مناطق ساخته شده به زمین کشاورزی تبدیل شده است. علاوه بر این، روی هم رفته بیش از ۱۰ درصد اراضی جنگلی به زمین‌های کشاورزی و مرتع تبدیل شده است. همانند دوره اول احتمال انتقال بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ نیز محاسبه شد. طی این دوره بیش‌ترین ماندگاری مربوط به کلاس اراضی ساخته شده است که به مقدار ۹۰% ثابت مانده است. کلاس تالاب در این بازه حدود ۲۵ درصد از مساحت خود را از دست داده و در مجموع ۱۲/۳۹ درصد از وسعت اراضی جنگلی به اراضی کشاورزی و مرتعی تبدیل شده است. علاوه بر این، حدود ۹ درصد از زمین‌های کشاورزی به مناطق مسکونی تبدیل شده است. از سوی دیگر، در این مدت حدود ٤ درصد از اراضی کشاورزی به جنگل تبدیل شده است (جدول ۵).

تهیه نقشه کاربری اراضی و پوشش زمین شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۲۳ یک پیش نیاز برای اعتبارسنجی مدل سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف است. در این مطالعه اعتبار مدل با محاسبه شاخص‌های سه‌بعدی اختلاف کمّیت، اختلاف تخصیص و شاخص شکل شایستگی ارزیابی شد. با مقایسه نقشه واقعی سال ۲۰۲۳ با نقشه شبیه‌سازی شده سال ۲۰۲۳ در قالب یک ماتریس جدول بندی متقابل، درصد کل شاخص‌های اختلاف تخصیص، اختلاف کمّیت و شکل شایستگی به ترتیب ٤/٦٥، ۲/۰۲، ٤٨/٦۰ محاسبه شد. صفر کردن همزمان خطای تخصیص (مکانی) و خطای کمیت حالت ایده‌آل در سنجش از دور است. مدل خطاهای تخصیص و کمّیت را عدد خیلی پایین تخمین زد. بنابراین، علاوه بر نمایش بصری دقت شبیه‌سازی در نگاره ٤، مقدار کم خطاهای مذکور در این مطالعه، اثربخشی

جدول ۵: ماتریس احتمال انتقال مارکوف در سال‌های مورد مطالعه

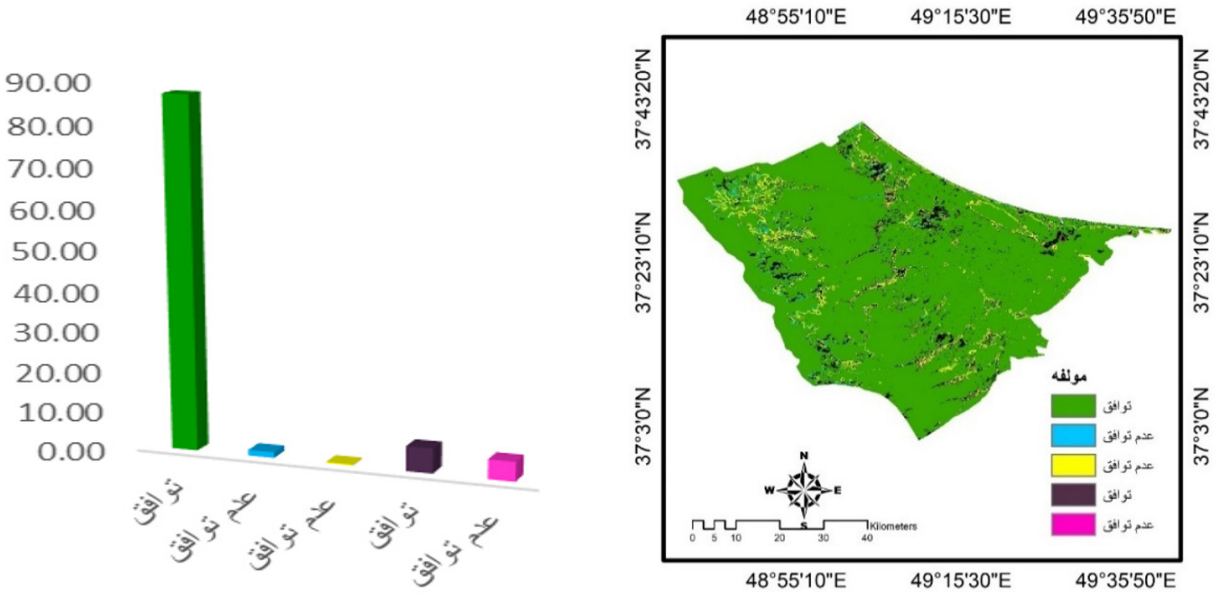
ماتریس احتمال انتقال (%)۲۰۱۰ – ۱۹۹۹	اراضی جنگلی	تالاب	اراضی ساخته‌شده	زمین کشاورزی	مرتع
اراضی جنگلی	۰/۸۹۲۳	۰	۰/۰۰۰٦	۰/۰۵۸۹	۰/۰٤۸۲
تالاب	۰	۰/۸۰۸٦	۰/۰۰٤۵	۰/۱۸٦۹	۰
اراضی ساخته شده	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۲	۰/۸۸۳٤	۰/۱۱٤۸	۰/۰۰۰۱
زمین کشاورزی	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۷٦	۰/۰۸٤٦	۰/۸۷۹۱	۰/۰۰۰۸
مرتع	۰/۲۱۵	۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۹	۰/۷۸۳۱
ماتریس احتمال انتقال (%)۲۰۲۳ – ۲۰۱۰	اراضی جنگلی	تالاب	اراضی ساخته‌شده	زمین کشاورزی	مرتع
اراضی جنگلی	۰/۸۷۳۵	۰	۰/۰۰۲٦	۰/۰۱۹۹	۰/۱۰٤
تالاب	۰	۰/۷۵۰۱	۰/۰۱۷۱	۰/۲۳۲۵	۰/۰۰۰۳
اراضی ساخته شده	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۹	۰/۹۰۲٦	۰/۰۹۳٤	۰/۰۰۲٤
زمین کشاورزی	۰/۰٤۵۳	۰/۰۰۳٦	۰/۰۹۱۷	۰/۸۵۸۸	۰/۰۰۰٦
مرتع	۰/۱۰۱۹	۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰٤	۰/۸۹٦۹

جدول ٦: نتایج اعتبار سنجی مدل سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف

کلاس‌های کاربری/ پوشش اراضی	ضریب کاهشی(loss)	پایداری(توافق)	ضریب افزایشی(Gain)	اختلاف تخصیص	اختلاف کمّیت	معیار شایستگی
اراضی جنگلی	۱/۲۹	۳۹/۲٦	۳/۲۰	۱/۹۱	۲/۵۷	۸۹/۷٦
تالاب	۰/۰۰	۰/۹۳	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۰۰	۸۲/۳۹
مناطق ساخته شده	۱/۹٦	۲/۷۲	۰/۱۲	۱/۸٤	۰/۲۳	٥٦/٦۷
زمین کشاورزی	۰/٤۱	۳۷/٥٦	۲/۹٥	۲/٥٤	۰/۸۱	۹۱/۸۰
مرتع	۳/۰۲	۱۲/۸٦	۰/۲۱	۲/۸۰	۰/٤۲	۷۹/۹۳
کل	٦/٦۷	۹۳/۳۹	٦/٦۷	٤/٦٥	۲/۰۲	٤۸/٦۰

جدول ۷: نتیجه اعتبارسنجی مدل در روش پونتیوس و میلونز/ مقدار مؤلفه‌های توافق و عدم توافق

Persistence simulated correctly (A-A-A)	۸۷/۱٤	ماندگاری به درستی شبیه‌سازی شده (توافق)
Persistence simulated as change (A-A-B)	۱/٤۳	شبیه‌سازی اشتباه ماندگاری بعنوان تغییر (عدم توافق)
Change simulated as a change to the wrong category (A-B-C)	۰/۲٦	شبیه‌سازی اشتباه تغییر (عدم توافق)
Change simulated correctly (A-B-B)	٦/۲٥	تغییر به درستی شبیه‌سازی شده (توافق)
Change simulated as persistence (A-B-A)	٤/۹۲	شبیه‌سازی تغییربه عنوان ماندگاری (عدم توافق)
Total	%۱۰۰	جمع
Simulated changes	%۷/۹٤	تغییرات شبیه‌سازی‌شده
Observed changes	%۱۱/٤۳	تغییرات مشاهده‌شده



نگاره ٦: نقشه حاصل از تکنیک سه‌بعدی پونتیوس و میلونز در پنج حالت و نمودار درصد مؤلفه‌های توافق و عدم توافق

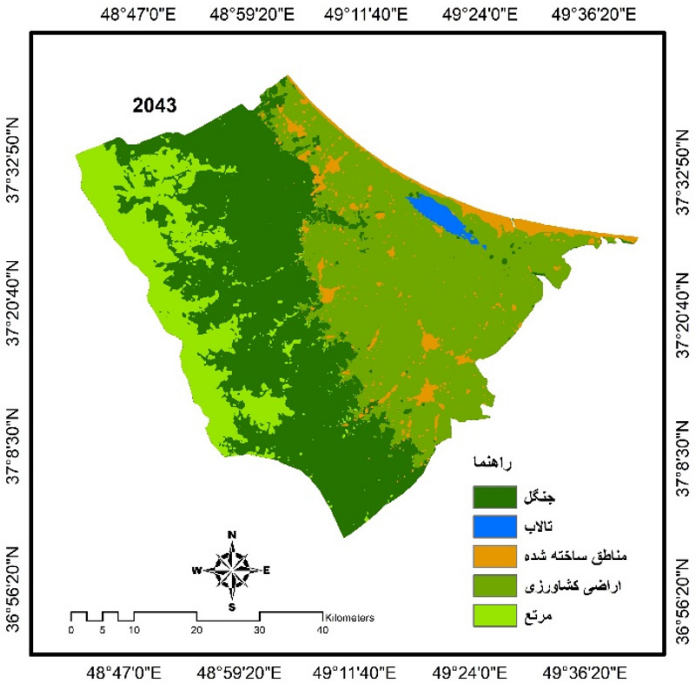
مدل را تأیید می‌کند (جدول ٦). بر اساس محاسبات ارائه‌شده در جدول ۷، توافق کل به دست آمده بین دو نقشه شبیه‌سازی‌شده و نقشه واقعی ۹۳/۳۹ درصد بود. در مقابل، تفاوت کلی بین دو نقشه ٦/٦۱ درصد بود، در نتیجه، عملکرد مدل تأیید شد (جدول ۷ نگاره ٦).

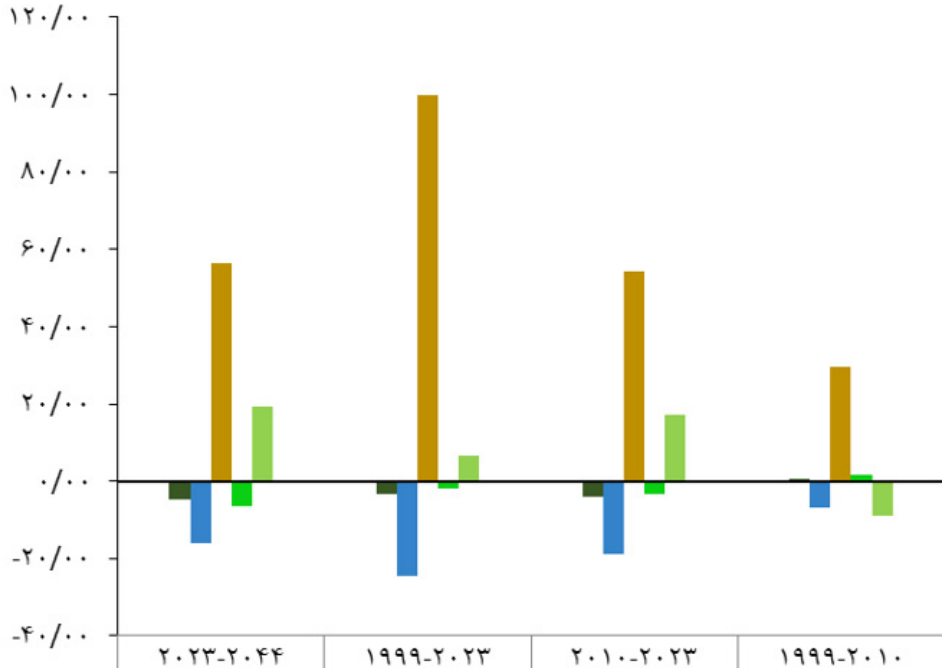
مدل سلول‌های خود کار زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی پویایی‌ها و الگوی تحولات مختلف در کاربری اراضی و پوشش زمین از جمله تغییرات شهری، اراضی کشاورزی، جنگل، و غیره، بسیار مفید است. در پژوهش حاضر از این مدل به عنوان یک ابزار تحلیلی برای پیش‌بینی تغییرات تا سال ۲۰٤۳ استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که با ادامه روند فعلی مدیریت کاربری اراضی و پوشش زمین، تغییرات در کلاس‌های اراضی مانند دوره تاریخی ادامه خواهد یافت. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰٤۳ مساحت اراضی جنگلی، تالاب و زمین‌های کشاورزی به ترتیب به میزان ۷۸۵۸/۱٦، ۵۷۸/۹٦ و ۵۸٤۰/۲٦ هکتار کاهش خواهد یافت. در مقابل، برای کلاس ساخته شده گسترش چشم‌گیری برآورد شده و مساحت آن ۵۷٦۰/۷٦ هکتار افزایش خواهد یافت. داده‌های جدول ۸ و نگاره ۷ به وضوح نشان می‌دهد فشار روزافزون فعالیت‌های انسانی و توسعه شهری بر منابع طبیعی در آینده نیز ادامه خواهد داشت و منجر به کوچک‌تر شدن مساحت این پهنه‌ها خواهد شد.

بررسی کلی نتایج حاصل از تغییرات طبقات نشان می‌دهد که منطقه ساخته شده رشد قابل توجهی را در مقایسه با سایر کلاس‌های کاربری اراضی و پوشش زمین در طول دوره مورد بررسی تجربه کرده است (نگاره ۷). به طور خاص، بین سال‌های ۲۰۲۳ – ۱۹۹۹، این کلاس نرخ رشد ۹۹/۷۵ را نشان می‌دهد. در صورتی که تغییری در وضعیت فعلی ایجاد نشود پیش‌بینی می‌شود که این روند با شیب نسبتاً تندی ادامه خواهد داشت به نحوی که بر اساس مدل خروجی حاصل از پژوهش حاضر، تا سال ۲۰٤۳ مساحت این کاربری با افزایش ٥٦ درصدی رو برو خواهد شد. یکی از عوامل اصلی که باعث افزایش مساحت اراضی ساخته شده در این منطقه شده اقلیم معتدل و مرطوب خزری است که این منطقه را به یک مقصد برجسته برای سکونت و گردشگری تبدیل کرده است و این جذابیت‌ها تأثیر مهمی بر توسعه اجتماعی و اقتصادی و رشد جمعیت داشته و به گسترش شهر نشینی و مناطق ساخته شده در این قسمت از شمال ایران منجر شده است. عوامل متعددی نظیر پاسخ‌های جمعیتی به تغییرات آب‌وهوایی و محیطی در مناطق مختلف (*Black et al, 2011: 3*)، تمرکز بر گردشگری به عنوان وسیله‌ای برای ایجاد اشتغال و توسعه اقتصادی به دلیل مشکلات اقتصادی در ساختار منطقه‌ای استان گیلان (*Ramazannejad et al, 2021 :109*) توسعه اقتصادی و رشد جمعیت به عنوان محرک‌های کلیدی گسترش شهری وتغییر الگوهای کاربری زمین (*Cai et al, 2020; Wu et al, 2022*) می‌توانند از دلایل چنین

جدول ۸: تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین ۲۰٤۳-۲۰۲۳

پوشش	۲۰۲۳		۲۰٤۳		تغییرات خالص
	مساحت(ha)	%	مساحت(ha)	%	۲۰۲۳-۲۰٤۳ (ha)
اراضی جنگلی	۱۲٤۹٦٥/۱۸	٤۱/٤٦	۱۱۹۱۲٤/۹۲	۳۹/٥۲	- ٥۸٤۰/۲٦
تالاب	۳٦۰٥/۰۳	۱/۲۰	۳۰۲٦/۰۷	۱/۰۰	- ٥۷۸/۹٦
اراضی ساخته شده	۱۰۱۹۹/۲۲	۳/۳۸	۱٥۹٥۹/۹۸	٥/۲۹	٥۷٦۰/۷٦
زمین کشاورزی	۱۱۸۲۲۷/٦۷	۳۹/۲۲	۱۱۰۳٦۹/٥۲	۳٦/٦۱	- ۷۸٥۸/۱٦
مرتع	٤٤٤٥۳/٦۲	۱٤/۷٥	٥۲۹۷۰/۲٤	۱۷/٥۷	۸٥۱٦/٦۲
جمع	۳۰۱٤٥۰/۷۲	۱۰۰/۰۰	۳۰۱٤٥۰/۷۲	۱۰۰/۰۰	





	۲۰۲۳-۲۰۴۴	۱۹۹۹-۲۰۲۳	۲۰۱۰-۲۰۲۳	۱۹۹۹-۲۰۱۰
جنگل	-۴/۶۷	-۳/۳۳	-۳/۹۳	۰/۶۲
تالاب	-۱۶/۰۶	-۲۴/۳۸	-۱۸/۷۰	-۶/۹۸
اراضی ساخته شده	۵۶/۴۸	۹۹/۷۵	۵۴/۱۵	۲۹/۵۹
اراضی کشاورزی	-۶/۶۵	-۱/۹۶	-۳/۴۱	۱/۵۰
مرتع	۱۹/۱۶	۶/۵۷	۱۷/۲۲	-۹/۰۸

نگاره ۷: توزیع فضایی تغییرات طبقات کاربری/ پوشش زمین سال ۲۰۴۳ و نمودار درصد افزایش/ کاهش در دوره‌های مورد مطالعه

تغییراتی در استان گیلان باشند. جنگل‌های شمال ایران که با نام جنگل‌های هیرکانی شناخته می‌شوند از نظر تأثیر بر زیست‌بوم‌ها و آب‌وهوا بسیار مهم هستند. این جنگل‌ها در سال‌های اخیر شاهد نابودی بوده‌اند و فرآیند از بین رفتن آن‌ها ادامه دارد. طبق یافته‌های مطالعه حاضر اراضی جنگلی بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۳ به میزان ۳/۳۳ درصد کاهش داشت. نتایج پیش‌بینی نمایانگر ادامه این روند با نزدیک به ۵ درصد کاهش تا سال ۲۰۴۳ است. ویژگی‌های طبیعی و فیزیوگرافی خاص منطقه مورد مطالعه و سهولت دسترسی به مناطق مختلف جنگلی سرعت تخریب جنگل‌های هیرکانی را شدت بخشیده و عوامل مختلفی مانند فعالیت‌های کشاورزی، تغییر کاربری اراضی، چرای بیش از حد دام‌ها، تغییر اقلیم و فشارهای محیطی نیز به این امر کمک کرده است. در این زمینه نتایج مطالعات کامیابی و اسداللهی نشان داد که گسترش زمین‌های کشاورزی و زیرکشت در مناطق جنگلی توسط ذینفعان محلی به عنوان دلایل اصلی از بین رفتن جنگل‌های هیرکانی محسوب می‌شوند ***(Kamyab et al, 2020:10)*** نقش جوامع در تخریب جنگل‌ها و همچنین تأثیر صاحبان سرمایه و صنایع وابسته به چوب که به محصولات جنگلی نیاز دارند، به عنوان عامل مهم دیگری در جنگل‌زدایی مورد تأکید قرار گرفته است ***(Mustofa, 2019:1)***. تالاب انزلی در شمال ایران اهمیت زیادی از نظر زیست‌شناسی، اکولوژی، و اقتصادی دارد. این تالاب در حفظ تعادل اکولوژیکی و کنترل سیلاب‌ها در منطقه نقش مهمی دارد. همچنین باعث تعدیل خواص فیزیکی و شیمیایی آب ورودی به دریای خزر می‌شود ***(Hassanzadeh et al, 2021:2)*** اما با این حال فعالیت‌های انسانی مانند سدسازی، جنگل‌زدایی، تغییر کاربری اراضی و استفاده گسترده از آب برای کشاورزی باعث شده تا بارهای رسوبی وارده به تالاب افزایش یابد. این افزایش بارهای رسوبی منجر به کاهش عمق تالاب و تغییرات در ویژگی‌های شیمیایی و زیستی آب آن شده است. همچنین، با افزایش جمعیت و گسترش شهرها و روستاها در اطراف تالاب، فشار انسانی بر این منطقه افزایش یافته است. این تغییرات، منجر به کاهش اندازه تالاب و تغییرات زیستی، از جمله کاهش جمعیت حیوانات و گیاهان منحصر به فردی که در این محیط زیستی زندگی می‌کنند، شده است. طبق یافته‌های پژوهش حاضر وسعت این پهنه آبی در طول دوره مورد مطالعه حدود ۲٤% کاهش یافته است همچنین پیش‌بینی شده که تا سال ۲۰٤۳ از مساحت آن به مقدار ۱٦ درصد دیگر کاسته خواهد شد. در این راستا نتایج مطالعات مهدیان و همکاران (۲۰۲۳) نیز نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی منجر به کاهش جریان و سطح آب در دریای خزر شده و به کاهش وسعت تالاب کمک کرده است ***(Mahdian et al, 2023:14)*** علاوه بر این، آلودگی تالاب به فلزات سنگین، نفت و آفت‌کش‌های آلی کلر تأثیر مخربی بر اندازه و سلامت اکولوژیکی آن داشته است، همچنین یافته‌های صادقی و همکاران نشان داد که شهرنشینی، گسترش صنعتی و فعالیت‌های کشاورزی فشرده نیز نقش مهمی در تخریب تالاب، رهاسازی دبی‌های سمی و بدتر شدن کیفیت آب آن داشته‌اند ***(Sadeghi Pasvisheh et al, 2021:13)***. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش وسعت اراضی کشاورزی بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۳ کاهش قابل‌توجهی داشته و اگر تغییری در وضع موجود ایجاد نشود این کاهش با شیب تند برای سال ۲۰٤۳ نیز پیش‌بینی می‌شود. این تغییرات از دلایل گوناگونی ناشی می‌شوند. نخست اینکه از یک سو هزینه‌های بالای تولید، قیمت پایین محصولات کشاورزی و عدم حمایت دولت از کشاورزان باعث شده تا زمین‌های کشاورزی را بصورت بایر رها کنند. از طرف دیگر نیاز جمعیت رو به رشد به مسکن و توسعه اقتصادی قیمت زمین را افزایش داده و باعث شده تا کشاورزان زمین‌ها را به قطعات کوچک تقسیم کرده و در نهایت آن را به سودجویان بفروشند. در این زمینه امیرنژاد (۲۰۱٤) در پژوهشی با عنوان بررسی عوامل مؤثر بر تمایل کشاورزان برای تغییر کاربری اراضی در استان مازندران دریافت که بیش‌ترین میزان تمایل به تغییر کاربری، مربوط به ساخت مسکن بوده است که به

علت نیاز به مسکن و افزایش قیمت زمین در سال‌های اخیر کشاورزان برای رسیدن به سطح درآمدی مطلوب اراضی کشاورزی را تغییر داده‌اند. رهنمایی و همکاران (۲۰۱۰) نیز به بررسی نقش دولت در رشد و گسترش فیزیکی شهر ماسال با تأکید بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی پیرامون پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که سیاست‌های دولت و افزایش جمعیت و مساحت اراضی ساخته‌شده در بستر زمین‌های کشاورزی عوامل از بین رفتن این اراضی هستند. خرده مالکی و تکه تکه شدن اراضی و کشاورزی سنتی به دلیل موانع متعدد اجتماعی-اقتصادی، تقنینی، نهادی، حاکمیتی، سیاسی، فردی، فنی و تکنولوژیکی از دلایل دیگری هستند که باعث تبدیل زمین‌های کشاورزی به کاربری‌های دیگر شده‌اند ***(Golmohammadi, 2021)***.

٤- نتیجه‌گیری

نقشه‌های پیش‌بینی‌شده نقش مهمی در برآورد تغییرات کاربری اراضی و منابع طبیعی، مانند جنگل‌ها، پهنه‌های آبی، تنوع زیستی، خاک، مواد معدنی و سایر عناصر ایفا می‌کنند. این نقشه‌ها به عنوان ابزار عملی برای تصمیم گیری آگاهانه در برنامه‌ریزی زیست محیطی و مدیریت منابع عمل می‌کنند و برنامه ریزان را قادر می‌کنند تا از پیامدهای نامطلوب زیست محیطی جلوگیری نمایند. در پژوهش حاضر تصاویر سه زمانه ماهواره لندست و الگوریتم طبقه‌بندی جنگل تصادفی در بستر گوگل ارث انجین برای تشخیص تغییرات تاریخی کاربری اراضی و پوشش زمین از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۳ مورد استفاده قرار گرفتند. دقت تصاویر طبقه‌بندی‌شده با استفاده از شاخص QADI تأیید شد. برای بهبود کارایی مدل سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف در پیش‌بینی تغییرات فضایی آینده روش ارزیابی چند معیاره با این مدل ادغام شد و با شبیه‌سازی و تأیید نتایج اعتبارسنجی امکان پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین برای سال ۲۰٤۳ فراهم شد. نتایج در نگاره ۷ نشان داد در محدوده مورد مطالعه در دوره تاریخی، مناطق ساخته شده و مراتع به ترتیب به میزان ٦/٥٧ و ۹۹/۷۵ درصد رشد داشته‌اند در مقابل، پوشش جنگلی، تالاب و اراضی کشاورزی به ترتیب ۳/۳۳، ۲٤/۳۸ و ۱/۹٦ درصد از مساحت خود را از دست دادند. همچنین برای دوره آینده نتایج مدل CAMarkov کاهش قابل توجهی در وسعت اراضی جنگلی، پهنه تالاب و اراضی کشاورزی و در مقابل افزایش وسعت اراضی ساخته شده را پیش‌بینی کرد. کاهش مشاهده شده در اراضی جنگلی، کشاورزی و تالاب نشان دهنده روند نگران‌کننده تخریب منابع طبیعی و محیط زیست است. تخریب جنگل‌های هیرکانی در شمال ایران پیامدهای گسترده‌ای برای محیط زیست از جمله از بین رفتن تنوع گیاهی و جانوری و تأثیر بر رفتارهای هیدرولوژیکی منطقه (افزایش سیل‌خیزی) خواهد داشت. بنابراین با توجه به اهمیت اکولوژیکی جنگل‌ها در حفظ ثبات خاک، تنظیم چرخه آب و حمایت از گیاهان و جانوران متنوع، حفظ و احیاء این جنگل‌ها ضروری به نظر می‌رسند. تالاب انزلی یکی از مهم‌ترین تالاب‌های ایران و جهان است. در دهه‌های اخیر این تالاب با کاهش سطح آب، آلودگی و کاهش تنوع زیستی مواجه شده است. این تحولات ناشی از فعالیت‌های انسانی، به طور جدی به تعادل اکوسیستم آن آسیب رسانده‌اند. از آنجایی که منطقه مورد مطالعه به دلیل شرایط آب‌وهوایی مساعد یکی از قطب‌های کشاورزی ایران است از بین رفتن زمین‌های کشاورزی می‌تواند تهدید جدی برای معیشت و اقتصاد این منطقه باشد. این اتفاق ممکن است منجر به کاهش تولید محصولات غذایی و افزایش بیکاری در بخش کشاورزی شود، که اثرات منفی بر اقتصاد محلی و جامعه دارد. علاوه برآن در حوزه‌های زیست محیطی پیامدهای گسترده‌ای مانند افزایش رواناب، فرسایش خاک و به دنبال آن خطر سیل‌خیزی را به همراه داشته باشد. بنابراین حفظ و بهره برداری پایدار از زمین‌های کشاورزی این منطقه ضروری است تا مزایای اقتصادی، اجتماعی و محیطی آن حفظ شود.

افزایش مساحت اراضی ساخته شده و مراتع در این

منطقه نشان دهنده فعالیت‌های مخربی است که منجر به تکه تکه شدن اراضی کشاورزی و از بین رفتن جنگل‌ها شده است. افزایش مساحت مناطق ساخته شده، پیامدهای بسیاری را برای محیط زیست و جامعه به همراه دارد. باعث کاهش کیفیت محیط زیست می‌شود، زیرا با ساخت و ساز بیش‌تر، فضاهای سبز کاهش می‌یابند و زمین‌های کشاورزی به ساختمان‌ها و جاده‌ها تبدیل می‌شوند. این مسئله منجر به کاهش تنوع زیستی و تغییرات در اکوسیستم‌ها می‌شود. از طرف دیگر ساخت و ساز بیش از حد، دمای سطح زمین را نیز افزایش می‌دهد و در نتیجه جزیره‌های حرارتی شهری بوجود می‌آیند. این امر باعث افزایش دما و تغییرات اقلیمی می‌شود که تأثیرات نامطلوبی بر روی سلامت و کیفیت زندگی افراد دارد. با توجه به این یافته‌ها، بررسی چند پیشنهاد کلیدی برای مدیریت و حفاظت پایدار از اراضی و پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه ضروری است. اولاً، یک نیاز اساسی برای اجرای برنامه‌ریزی کاربری زمین و مقررات منطقه بندی مؤثر برای کنترل پراکندگی شهری و حفاظت از مناطق طبیعی باقی مانده وجود دارد. این را می‌توان از طریق ایجاد مناطق حفاظت شده، کمربندهای سبز و استراتژی‌های توسعه پایدار شهری به دست آورد.

شیوه‌های کشاورزی مبتنی بر اصول اکولوژیکی: ترویج شیوه‌های کشاورزی اکولوژیکی که بر تنوع زیستی، سلامت خاک، و مدیریت پایدار زمین تأکید دارد و دانش سنتی را با تکنیک‌های کشاورزی مدرن برای افزایش بهره‌وری کشاورزی و در عین حال حفظ منابع طبیعی ادغام می‌کند.

احیای چشم انداز جنگل: اجرای یک برنامه جامع احیای چشم انداز جنگل با تمرکز بر جنگل‌کاری و احیای اراضی جنگلی تخریب شده، با تأکید بر حفظ گونه‌های درختی بومی و احیای اکوسیستم‌های جنگلی.

حفاظت و احیای تالاب: تدوین و اجرای طرح حفاظت و احیای تالاب انزلی با تمرکز بر احیای زیستگاه، مدیریت پایدار آب و کنترل آلودگی به منظور ارتقای یکپارچگی اکولوژیکی و تنوع زیستی تالاب.

برنامه‌ریزی پایدار کاربری اراضی: هماهنگی برنامه‌ها به عبارت دیگر ایجاد تعادل بین توسعه کشاورزی و حفاظت از جنگل‌ها با تمرکز برملاحظات اکولوژیکی و اهداف بلند مدت توسعه پایدار.

مشارکت دادن جوامع محلی در ابتکارات حفاظتی از طریق رویکردهای مشارکتی، توانمندسازی آن‌ها برای ایفای نقش فعال در بازسازی و حفظ منابع طبیعی.

توسعه اکوتوریسم: تشویق به نوآوری‌های اکوتوریسم پایدار که به بازدیدکنندگان رفتار مسئولانه را یادآوری می‌کند، آگاهی آن‌ها را در حفظ محیط زیست افزایش می‌دهد و به اقتصاد جوامع محلی کمک می‌کند، در عین حال اثرات منفی بر اکوسیستم‌های طبیعی را به حداقل ممکن می‌رساند.

تعارض منافع

در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

References

1. Ahadnezhad Roshti, M., & Hosseinalizadeh, M. (2021). Monitoring and predicting spatial changes in urban land use and land cover (Case Study: Babol and Amirkala urban areas). Physical Development Planning, 8(3), 57-73.
2. Ahmad, S., Israr, M., Ahmed, R., Ashraf, A., Amin, M., & Ahmad, N. (2022). Land use and cover changes in the Northern Mountains of Pakistan; A spatio-temporal change using MODIS (MCD12Q1) time series. Sarhad J. Agric, 38, 1419,1419-1429.
3. Altartouri, A., & Jolma, A. (2013). A Naive Bayes classifier for modeling distributions of the common reed in Southern Finland. Paper presented at the 20th International Congress on Modelling and Simulation MODSIM 2013; Adelaide, Australia; 1-6 December 2013,1645-1651.
4. Alyaquby, A, & Asal Kzar, A. (2024). Change Detection Using Multispectral Satellite Images for

Sustainable Development in Regions of Al-Najaf Al-Ashraf, Iraq. Journal of Kufa-Physics, 16(01), 42–55. https://doi.org/10.31257/2018/JKP/2024/v16.i01.14155.

5. Amirnejad, H. (2014). Investigating factors influencing farmers' tendency to change land use in Mazandaran Province. Economics Agricultural Research, 5(20), 87-106.

6. Arabi Aliabad, F., Zare, M., & Ghafarian Malmiri, H. R. (2021). Predicting land cover changes using the integrated Markov chain and cellular automata model (Case Study: Shirkouh Basin). Geography and Development, 19(62), 251-270. https://doi.org/10.22111/gdij.2021.6022.

7. Asif, M., Kazmi, J. H., Tariq, A., Zhao, N., Guluzade, R., Soufan, W., . . . Aslam, M. (2023). Modelling of land use and land cover changes and prediction using CA-Markov and Random Forest. Geocarto International, 38(1), 2210532.

8. Basukala, A. K., Oldenburg, C., Schellberg, J., Sultanov, M., & Dubovyk, O. (2017). Towards improved land use mapping of irrigated croplands: Performance assessment of different image classification algorithms and approaches. European Journal of Remote Sensing, 50(1), 187-201.

9. Black, R., Adger, W. N., Arnell, N. W., Dercon, S., Geddes, A., & Thomas, D. (2011). The effect of environmental change on human migration. Global environmental change, 21, S3-S11.

10. Buraka, T., Elias, E., & Lelago, A. (2021). Analysis and Prediction of Land Use/land Cover Changes and Driving Forces by Using GIS and Remote Sensing in the Coka Watershed, Southern Ethiopia. Indian Journal of Agricultural Research. 56(5): 581-587. doi: 10.18805/IJARe.A-699.

11. Cai, W., & Fangyuan, T. (2020). Spatiotemporal characteristics and driving forces of construction land expansion in Yangtze River economic belt, China. PLoS One, 15(1), e0227299.

12. Chen, Z., Liu, Y., Chen, D., & Peng, B. (2024). Exploring the impacts of land use and land cover change on ecosystem services in Dongting Lake, China: a spatial and temporal analysis. Frontiers in Environmental Science, 12, 1395557.

13. Congalton, R.G., & Green, K. (2019). Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, Third Edition (3rd ed.). CRC Press,127-142.

14. Dos Santos, W. P., Acuña-Guzman, S. F., de Oliveira, P. T., Beniaich, A., Cardoso, D. P., Silva, M. L., Avanzi, J. C. (2024). CA-Markov prediction modeling for the assessment of land use/land cover change in two sub-basins of the Tocantins-Araguaia River Basin. Environmental Monitoring and Assessment, 196(6), 499.

15. Feizizadeh, B., Darabi, S., Blaschke, T., & Lakes, T. (2022). QADI as a New Method and Alternative to Kappa for Accuracy Assessment of Remote Sensing-Based Image Classification. Sensors, 22(12), 4506. 1-21.

16. Feizizadeh, B., Garajeh, M. K., Blaschke, T., & Lakes, T. (2021). An object based image analysis applied for volcanic and glacial landforms mapping in Sahand Mountain, Iran. Catena, 198, 105073,1-19.

17. Fu, F., Deng, S., Wu, D., Liu, W., & Bai, Z. (2022). Research on the spatiotemporal evolution of land use landscape pattern in a county area based on CA-Markov model. Sustainable Cities and Society, 80, 103760.

18. Gemmechis, W. A. (2022). Land Use Land Cover Dynamics Using CA-Markov Chain Model and Geospatial techniques: A Case of Belete Gera Regional Forest Priority Area, South Western Ethiopia.

19. Getachew, B., Manjunatha, B., & Bhat, H. G. (2021). Modeling projected impacts of climate and lanuse/landcover changes on hydrological responses in

Emamgholizadeh, S. (2022). Evaluating the integrated Markov chain and cellular automata model in simulating land use and land cover changes in Gotvand Dam. Water and Sustainable Development, 9(2).

28. Leta, M. K., Demissie, T. A., & Tränckner, J. (2021a). Hydrological responses of watershed to historical and future land use land cover change dynamics of Nashe watershed, Ethiopia. Water, 13(17), 2372,1-20.

29. Li, S. (2022). Study of urbanization trend prediction in Nanchang based on CA-Markov model. Paper presented at the E3S Web of Conferences.

30. Liping, C., Yujun, S., & Saeed, S. (2018). Monitoring and predicting land use and land cover changes using remote sensing and GIS techniques—A case study of a hilly area, Jiangle, China. PloS one, 13(7), e0200493.

31. Liu, B., Pan, L., Qi, Y., Guan, X., & Li, J. (2021). Land use and land cover change in the Yellow River Basin from 1980 to 2015 and its impact on the ecosystem services. Land, 10(10), 1080, 1-23.

32. Mahdian, M., Hosseinzadeh, M., Siadatmousavi, S. M., Chalipa, Z., Delavar, M., Guo, M., . . . Noori, R. (2023). Modelling impacts of climate change and anthropogenic activities on inflows and sediment loads of wetlands: case study of the Anzali wetland. Scientific Reports, 13(1), 5399, 1-18.

33. Mahto, R., Sahu, M., & Kumar Soni, P. (2022). Change Detection of Vegetative Covers in Kalara Nala Watershed of Damoh District Using Remote Sensing and GIS. International Journal of Environment and Climate Change, 12(12), 1680-1689.

34. Manakane, S. E., Latue, P. C., Somae, G., & Rakuasa, H. (2023). Prediction of Land Cover Change in Wae Heru Watershed Ambon City Using Celular Automata Markov Chain. Journal of Geographical Sciences and Education, 1(1), 1-11.

the Lake Tana Basin, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. Journal of Hydrology, 595, 125974.

20. GOLMOHAMMADİ, F. (2021). Land fragmentation in confronting to sustainable agricultural development and food security in Iran. Black Sea Journal of Public and Social Science, 4(1), 1-10.

21. Gómez, C., White, J. C., & Wulder, M. A. (2016). Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 116, 55-72. Hassanzadeh, M., Zarkami, R., & Sadeghi, R. (2021). Uptake and accumulation of heavy metals by water body and Azolla filiculoides in the Anzali wetland. Applied Water Science, 11(6), 91,1-8.

22. Hasan, F. (2024). Urban Growth Modeling in Kurunegala, Sri Lanka using Cellular Automata/ Markov Chain Multi-Criteria Analysis and Markov-Markovian Transition Estimator.

23. He, Y., Wu, W., Xie, X., Ke, X., Song, Y., Zhou, C., . . . Song, P. (2023). Land Use/Cover Change Prediction Based on a New Hybrid Logistic-Multicriteria Evaluation-Cellular Automata-Markov Model.

24. Hellwig, N., Walz, A., & Markovic, D. (2019). Climatic and socioeconomic effects on land cover changes across Europe: Does protected area designation matter? PLoS One, 14(7), e0219374.1-20.

25. Kamyab, H., & Asadolahi, Z. (2020). Targeting area and comparing the effect of different land use/ land cover (LULC) scenarios on greenhouse gases (GHGs) emission reduction (Case study: Hyrcanian forests in Iran),1-21.

26. Keshtkar, H., & Voigt, W. (2016). A spatiotemporal analysis of landscape change using an integrated Markov chain and cellular automata models. Modeling Earth Systems and Environment, 2(1), 1-13.

27. Kianpour Kolkhaje, M., Pazhouhesh, M., &

35. Mansour, S., Al-Belushi, M., & Al-Awadhi, T. (2020). Monitoring land use and land cover changes in the mountainous cities of Oman using GIS and CA-Markov modelling techniques. Land Use Policy, 91, 104414.

36. Mengistu, T. D., Chung, I.-M., Kim, M.-G., Chang, S. W., & Lee, J. E. (2022). Impacts and implications of land use land cover dynamics on groundwater recharge and surface runoff in East African Watershed. Water, 14(13), 2068,1-18.

37. Moazzeni, M., & Pourmohammadi, M. R. (2020). Spatio-temporal modeling of urban development trends with emphasis on land use changes using the Markov-CA model (Case Study: Parsabad Moghan). Geography and Planning, 24(73), 349-377.

38. Mustofa, M. (2019). The Countermeasure of Forest Destruction Through Communities Based on Land Utilization Empowerment in Gembong Sub-District, Pati Regency, Central Java Province. Paper presented at the Proceedings of the 1st International Conference on Environment and Sustainability Issues, ICESI 2019, 18-19 July 2019, Semarang, Central Java, Indonesia,1-9.

39. Nasiri, V., Deljouei, A., Moradi, F., Sadeghi, S. M. M., & Borz, S. A. (2022). Land use and land cover mapping using Sentinel-2, Landsat-8 Satellite Images, and Google Earth Engine: A comparison of two composition methods. Remote Sensing, 14(9), 1977.

40. Nguyen, C. H., Van Nguyen, C., & Nguyen, T. M. N. (2023). Monitoring and Modeling of Spatio-Temporal Urban Expansion and Land Use/Land-Cover Change in Mountain Landscape: A Case Study of Dalat City, Vietnam. Environment & Natural Resources Journal, 21(5).

41. Nyatuame, M., Agodzo, S., Amekudzi, L. K., & Mensah-Brako, B. (2023). Assessment of past and future land use/cover change over Tordzie watershed in Ghana. Frontiers in Environmental Science, 11, 1139264.

42. Paegelow, M., Mas, J.-F., Gallardo, M., Camacho Olmedo, M. T., & García-Álvarez, D. (2022). Pontius Jr. Methods based on a cross-tabulation matrix to validate land use cover maps Land Use Cover Datasets and Validation Tools: Validation Practices with QGIS (pp. 153-187): Springer International Publishing Cham.

43. Prashanth, M., Kumar, A., Dhar, S., Verma, O., Rai, S. K., & Kouser, B. (2023). Land use/land cover change and its implication on soil erosion in an ecologically sensitive Himachal Himalayan watershed, Northern India. Frontiers in Forests and Global Change, 6, 1124677,1-17.

44. Rahnemaii, M. T., Kalantari, M., & Safari, P. (2010). Examining the role of government in the physical expansion of Masal city with an emphasis on changing agricultural land use in the surrounding areas. Geography (Scientific Iranian Geographic Association), 8(26), 1-31.

45. Ramazannejad, Y., Zarghamfard, M., Hajisharifi, A., & Azar, S. (2021). Factors behind tourists' travel motivation: The case of the Gilan region, Iran. Quaestiones Geographicae, 40(4), 101-112.

46. Reddy, C. S., Singh, S., Dadhwal, V., Jha, C., Rao, N. R., & Diwakar, P. (2017). Predictive modelling of the spatial pattern of past and future forest cover changes in India. Journal of Earth System Science, 126, 1-16.

47. Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Wang, N., & Lin, Y. (2017). Monitoring and modeling of spatiotemporal urban expansion and land-use/land-cover change using integrated Markov chain cellular automata model. ISPRS International Journal of Geo-Information, 6(9), 288.

48. Rodaro, E., & Yeldan, Ö. (2013). A multi-lane traffic simulation model via continuous cellular automata. arXiv preprint arXiv:1302.0488,1-32.

49. Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy assessment of land use/land cover classification

for Research in Applied Science and Engineering Technology, 11 (2), 1199-1203.

56. Sun, J., & Ongsomwang, S. (2023). Optimal parameters of random forest for land cover classification with suitable data type and dataset on Google Earth Engine. Frontiers in Earth Science, 11, 1188093.

57. Wang, S. W., Gebru, B. M., Lamchin, M., Kayastha, R. B., & Lee, W.-K. (2020). Land use and land cover change detection and prediction in the Kathmandu district of Nepal using remote sensing and GIS. Sustainability, 12(9), 3925.

58. Wu, Y., Han, Z., Faisal Koko, A., Zhang, S., Ding, N., & Luo, J. (2022). Analyzing the Spatio-Temporal Dynamics of Urban Land Use Expansion and Its Influencing Factors in Zhejiang Province, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(24), 16580.

59. Zhang, Z., Wei, Y., Li, X., Wan, D., & Shi, Z. (2024). Study on Tianjin Land-Cover Dynamic Changes, Driving Factor Analysis, and Forecasting. Land, 13(6), 726.

60. Zimba, H. M., Banda, K. E., Mbewe, S., & Nyambe, I. A. (2024). Integrated use of the CA–Markov model and the Trends. Earth module to enhance the assessment of land cover degradation. Environmental Systems Research, 13(1), 25.

using remote sensing and GIS. International Journal of Geosciences, 8(04), 611-622.

50. Sabzpoushan, S. H., & Pourhasanzade, F. (2011). A cellular automata-based model for simulating restitution property in a single heart cell. Journal of medical signals and sensors, 1(1), 19,19-23.

51. Sadeghi Pasvisheh, R., Eurie Forio, M. A., Ho, L. T., & Goethals, P. L. (2021). Evidence-based management of the Anzali Wetland system (Northern Iran) based on innovative monitoring and modeling methods. Sustainability, 13(10), 5503, 1-16.

52. Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA–Markov model. Mathematical and Computer Modelling, 54(3-4), 938-943.

53. Saputro, D. R. S., & Sidiq, K. (2023). cable news network (cnn) articles classification using random forest algorithm with hyperparameter optimization. barekeng: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan, 17(2), 0847-0854.

54. Saraf, P., & Regulwar, D. G. (2024). Land Use Land Cover Analysis for Godavari Basin in Maharashtra Using Geographical Information System and Remote Sensing. Journal of Geographic Information System, 16(1), 21-31.

55. Singh, M., & Mohapatra, S. (2023). Land Use and Land Cover Change Scenario of the Betwa River Basin of Madhya Pradesh: An Analysis Using Remote Sensing and GIS. International Journal

COPYRIGHTS

©2026 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NoDerivs 4.0 International (CC BY-ND 4.0)